



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIEROS
INDUSTRIALES VALENCIA

TRABAJO FIN DE MASTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

ANÁLISIS DE LA PROPAGACIÓN DE VIBRACIONES DE ORIGEN FERROVIARIO MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

AUTOR: FRANCISCO MIGUEL AROCA JIMÉNEZ

TUTOR: JOSÉ ALBELDA VITORIA

COTUTOR: ANTONIO BESA GONZÁLVEZ

Curso Académico: 2018-19

RESUMEN

El presente documento muestra un procedimiento de análisis de la propagación de vibraciones de origen ferroviario a los edificios cercanos. Este cálculo se realiza mediante el método de los elementos finitos y el procedimiento se aplica a un caso concreto de circulación del tren en túnel, con el fin de comparar la efectividad de distintas soluciones usadas para la corrección de los problemas vibratorios de esa índole. El trabajo se divide en varias partes. Se empieza por una introducción que incluye la motivación justificación del trabajo, después se pasa a la definición del procedimiento de desarrollo del modelo de cálculo, posteriormente se aplica el procedimiento a una serie de casos y, por último, se analizan y comparan los resultados obtenidos de los diversos casos planteados.

Palabras clave: vibraciones, ferrocarril, método elementos finitos, medidas correctoras

RESUM

El present document mostra un procediment d'anàlisi de la propagació de vibracions d'origen ferroviari als edificis propers. Aquest càlcul es realitza mitjançant el mètode dels elements finits i el procediment s'aplica a un cas concret de circulació del tren en túnel, amb l'objectiu de comparar l'efectivitat de distintes solucions utilitzades per a la correcció de problemes vibratoris d'aquesta índole. El treball es divideix en vàries parts. Es comença per una introducció que inclou la motivació i justificació del treball, després es passa a la definició del procediment de desenvolupament del model de càlcul, posteriorment s'aplica el procediment a una sèrie de casos i, per últim, s'analitzen i comparen els resultats obtinguts dels diversos casos plantejats.

Paraules clau: vibracions, ferrocarril, mètode elements finits, mesures correctores

ABSTRACT

This document shows an analysis procedure for the propagation of vibrations from railway sources to nearby buildings. This calculation is done by means of the finite element method and the procedure is applied to a particular case in which the train is circulating through a tunnel stretch, with the objective of comparing the effectivity of different solutions used for the correction of vibration problems of this type. The document is divided in several parts. Starting with an introduction, which includes the motivation and justification behind the work, after that comes the definition of the procedure and the development of the calculation model, subsequently the procedure is applied to a series of cases and, lastly, the obtained results from the cases are analysed.

Keywords: vibrations, railway, finite element method, corrective solutions

ÍNDICE

Documentos contenidos en el TFM:

- Memoria
- Presupuesto

Índice de la memoria

ÍNDICE	1
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	4
ÍNDICE DE TABLAS	6
ÍNDICE DE ECUACIONES	6
INTRODUCCIÓN	7
¿Porque el ferrocarril?	7
Impacto ambiental del ferrocarril	11
El ruido y las vibraciones	11
OBJETIVO DEL TRABAJO	17
DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	17
El modelo matemático del problema	17
Descripción del método de los elementos finitos (MEF).....	19
Descripción del sistema dinámico	22
Cálculo de la fuerza aplicada	24
Proceso de cálculo completo automatizado	26
Truncamiento del dominio: condición de contorno absorbente	29
MEDIDAS CORRECTORAS VIBRACIONES	32
EJECUCIÓN DEL MODELO DE ELEMENTOS FINITOS	36
Definición de materiales del modelo.....	36
Partes del modelo	37
Carril.....	38
Rail pad.....	38
Túnel	39
Terreno.....	40
Edificio.....	41
Configuración del mallado.....	42
¿CÓMO SE MIDE EL IMPACTO VIBRATORIO?.....	44
ANÁLISIS DE RESULTADOS	49
Caso "BASE"	50
Caso "RAIL_PAD"	51
Caso "LOSA_FLOT"	56
Caso "BASE_EDIF"	60
Caso "ZANJAS"	63
CONCLUSIONES.....	65
FUTUROS TRABAJOS.....	66
BIBLIOGRAFÍA.....	67
ANEXO I: APLICACIÓN PRÁCTICA DE LA CONDICIÓN DE CONTORNO ABSORBENTE.....	69

Índice del presupuesto

COSTE UNITARIO DE LOS MATERIALES Y MANO DE OBRA.....	72
CAPÍTULOS	72
RESUMEN.....	74

MEMORIA

Índice de ilustraciones

Ilustración 1. Evolución de la intensidad energética de los medios de transporte (Williams, 2017)	8
Ilustración 2. Evolución del volumen de viajeros en España	9
Ilustración 3. Evolución del volumen de mercancías transportadas en España	10
Ilustración 4. Evolución de la longitud de la red de ADIF por tipo de electrificación (OTLE, 2018)	10
Ilustración 5. Ponderaciones habituales usadas en el análisis de ruido (Lindosland, 2019)	13
Ilustración 6. Ponderación utilizada en EEUU para el análisis de vibraciones (Hanson, Ross, D.A., & Harris, 2012).....	13
Ilustración 7. Esquema del mecanismo de transmisión de ruido aéreo (Hanson, Ross, D.A., & Harris, 2012)	13
Ilustración 8. Esquema del mecanismo de transmisión de vibraciones (Hanson, Ross, D.A., & Harris, 2012)	13
Ilustración 9. Ejemplo de plano de rueda (Bobo11, 2019).....	15
Ilustración 10. Comparación de velocidades de ondas elásticas (NoahMitchell, 2019)	15
Ilustración 11. Esquema del modelo del sistema	17
Ilustración 12. Paso de la sección 2D al modelo 3D por extrusión	18
Ilustración 13. Esquema de caja negra del sistema dinámico	22
Ilustración 15. Ejemplo de función de transferencia	23
Ilustración 16. Datos geométricos serie 4300 FGV	24
Ilustración 17. Gráfica F(dist)	24
Ilustración 18. Gráfica F(t)	25
Ilustración 19. Espectro en frecuencia de la señal de fuerza	26
Ilustración 20. Código de la macro de generación de LS	27
Ilustración 21. Código de macro de bucle de cálculo y extracción de resultados	28
Ilustración 22. Truncamiento del dominio del problema	29
Ilustración 23. Ejemplo de área asignada al nodo	30
Ilustración 24. Forma del dominio truncado	31
Ilustración 25. Ejemplo de fijación elástica (AGICO GROUP, 2019)	33
Ilustración 26. Traviesa Greenrail™ (Giarrusso, 2019)	33
Ilustración 27. Manta bajo balasto (Specifier, 2019)	34
Ilustración 28. Losa flotante sobre apoyos puntuales (PRC Ltd, 2019).....	34
Ilustración 29. Esquema sistema dinámico 1 GDL	34
Ilustración 30. Función de transmisibilidad de fuerzas.....	34
Ilustración 31. Valores del factor de pérdidas para algunos materiales (Vér & Beranek, 2010).....	37
Ilustración 32. Carril 60E1 (ArcelorMittal, 2019)	38
Ilustración 33. Representación gráfica del carril (cotas en metros)	38
Ilustración 34. Representación gráfica del rail pad (cotas en metros).....	38
Ilustración 35. Representación gráfica del túnel (cotas en metros)	39
Ilustración 36. Representación gráfica del terreno (cotas en metros)	40
Ilustración 37. Zanjas situadas entre el túnel y el edificio	40
Ilustración 38. Representación gráfica del edificio (cotas en metros)	41
Ilustración 39. Franja de la base del edificio con distinto material.....	41
Ilustración 40. Análisis modal forjado independiente	42
Ilustración 41. Elemento PLANE182 (Sharcnnet, 2019)	42
Ilustración 42. Transformación de FRF de desplazamiento a FRF de aceleración.....	45
Ilustración 43. Suma de componentes de la FRF de aceleración	45
Ilustración 44. Interpolación de FRF de aceleración	46
Ilustración 45. Cálculo de la amplitud de la aceleración total	46
Ilustración 46. Paso de espectro de banda estrecha a banda de tercios de octava.....	47

Ilustración 47. Aplicación de la ponderación W_m	48
Ilustración 48. Posición de nodos para extracción de resultados	49
Ilustración 49. Aceleración caso BASE en tercios de octava sin ponderar	50
Ilustración 50. Desplazamientos del edificio para una excitación de 1.06824 Hz (multiplicados por 10^8)	51
Ilustración 51. Desplazamientos del edificio para una excitación de 34.3273 Hz (multiplicados por 10^{10})	51
Ilustración 52. Resultados del índice Law, caso RAIL_PAD	52
Ilustración 53. Variación de la FRF de aceleración con la rigidez del rail pad	53
Ilustración 54. Gráfica relación E rail pad y frecuencia de resonancia.....	54
Ilustración 55. Gráfica de la aproximación de la rigidez de diseño para cada frecuencia de atenuación	55
Ilustración 56. Esquema del caso de carga vertical del rail pad.....	56
Ilustración 57. Resultados del índice Law, caso LOSA_FLOT.....	57
Ilustración 58. Detalle del desplazamiento de la losa para 44 Hz y $E = 3e5$ Pa	59
Ilustración 59. Detalle del desplazamiento de la losa para 55 Hz y $E = 3e5$ Pa	59
Ilustración 60. Incremento del nivel de la FRF de aceleración total con losa flotante 1	59
Ilustración 61. Incremento del nivel de la FRF de aceleración total con losa flotante 2	59
Ilustración 62. Incremento del nivel de la FRF de aceleración total con losa flotante 3	59
Ilustración 63. Relación entre módulo elástico y frecuencias características para el caso LOSA_FLOT	60
Ilustración 64. Resultados del índice Law, caso BASE_EDIF	61
Ilustración 65. Incrementos espectros FRF aceleración caso BASE_EDIF 1	62
Ilustración 66. Incrementos espectros FRF aceleración caso BASE_EDIF 2	62
Ilustración 67. Deformación del edificio a 14.4 Hz en el caso BASE_EDIF con $E=3e5$ Pa (amplificada 10^9 veces)	62
Ilustración 68. Deformación del edificio a 2.54 Hz en el caso BASE_EDIF con $E=3e5$ Pa (amplificada 10^8 veces)	62
Ilustración 69. Resultados del índice Law, caso ZANJAS.....	63
Ilustración 70. Esquema del elemento COMBIN14 (Sharcnet, 2019)	69

Índice de tablas

Tabla 1. Propiedades de los materiales del modelo	36
Tabla 2. Dimensiones de los soportes de losa	39
Tabla 3. Límites del índice Law según Real Decreto 1367/2007	48
Tabla 4. Resultados Law caso BASE	50
Tabla 5. Valores de E rail pad y frecuencia de resonancia	54
Tabla 6. Comparación valores Law caso BASE y caso LOSA_FLOT	57

Índice de ecuaciones

Ecuación 1. Definición de intensidad energética	7
Ecuación 2. Cálculo de la velocidad de propagación de las ondas longitudinales en un material	15
Ecuación 3. Ecuación generalizada del movimiento	20
Ecuación 4. Módulo de Young complejo	21
Ecuación 5. Ecuación del movimiento modificada	21
Ecuación 6. Definición de la función de transferencia	23
Ecuación 7. Constantes de la condición de contorno absorbente	30
Ecuación 8. Cálculo de la frecuencia natural de un sistema dinámico de 1 GDL	34
Ecuación 9. Cálculo del índice Law	48
Ecuación 10. Ajuste por mínimos cuadrados de la relación entre fres y E	54
Ecuación 11. Ecuación para la fres de un sistema de 1GDL	54
Ecuación 12. Relación observada entre fres y fat para el caso RAIL_PAD	55
Ecuación 13. Aproximación de E necesario para una fat determinada	55
Ecuación 14. Cálculo de la rigidez vertical del rail pad	56
Ecuación 15. Relación observada entre fres y fat para el caso LOSA_FLOT	60

Introducción

¿Porque el ferrocarril?

El ferrocarril es un modo de transporte terrestre capaz de desplazar gran cantidad de pasajeros y cargas de un volumen y peso relativamente grandes con rapidez, puntualidad y alta eficiencia energética.

Estas características del transporte por vía férrea provienen de diversos factores.

- El uso del acero, un material de alta rigidez, en los elementos mecánicos permite la transmisión correcta de altas cargas del vehículo a la vía manteniendo las geometrías de ambos.
- Esta alta capacidad de carga permite además la instalación de motores más potentes y pesados que, acompañados de un adecuado diseño del sistema de alimentación del vehículo, permiten al material rodante alcanzar altas velocidades.
- Además, los sistemas actuales de gestión del tráfico ferroviario permiten mantener altas tasas de puntualidad.
- Y, por último, la baja resistencia a la rodadura al ser el sistema rueda-raíl completamente de acero es el principal factor responsable de la alta eficiencia energética de este modo de transporte. El orden de esta resistencia a la rodadura se sitúa en los 30 Newton por tonelada, muy baja comparada con los 195 Newton por tonelada de las ruedas con neumáticos de los automóviles. (Álvarez Rodríguez, 2010)

Es esta última característica, su alta eficiencia energética, la que suscita un mayor interés por este modo de transporte en el estado actual de crisis energética. Por eso mismo se centra la atención brevemente en este tema para obtener una visión global del problema energético y del papel del transporte por ferrocarril en su solución. Para ello se realiza una comparativa entre los diferentes modos de transporte a través de un indicador común: la intensidad energética.

La intensidad energética es una medida de la eficiencia energética de los modos de transporte que se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Intensidad Energética} = \frac{\text{Energía consumida en el transporte}}{(\text{pasajeros o kg de carga transportados}) * (\text{km que han sido transportados los pasajeros o la carga})}$$

Ecuación 1. Definición de intensidad energética

La Intensidad Energética (IE) es pues un indicador que:

- Disminuye cuando se reduce la energía consumida para una misma carga y recorrido.
- Disminuye cuando se transportan más pasajeros o carga (o se transportan una mayor distancia) utilizando la misma cantidad de energía.

Así pues, cuanto menor sea el valor de la IE de un modo de transporte, más energéticamente eficiente es ese modo.

A continuación, se muestra la evolución a lo largo de los años de la intensidad energética de varios modos de transporte de pasajeros en los Estados Unidos:

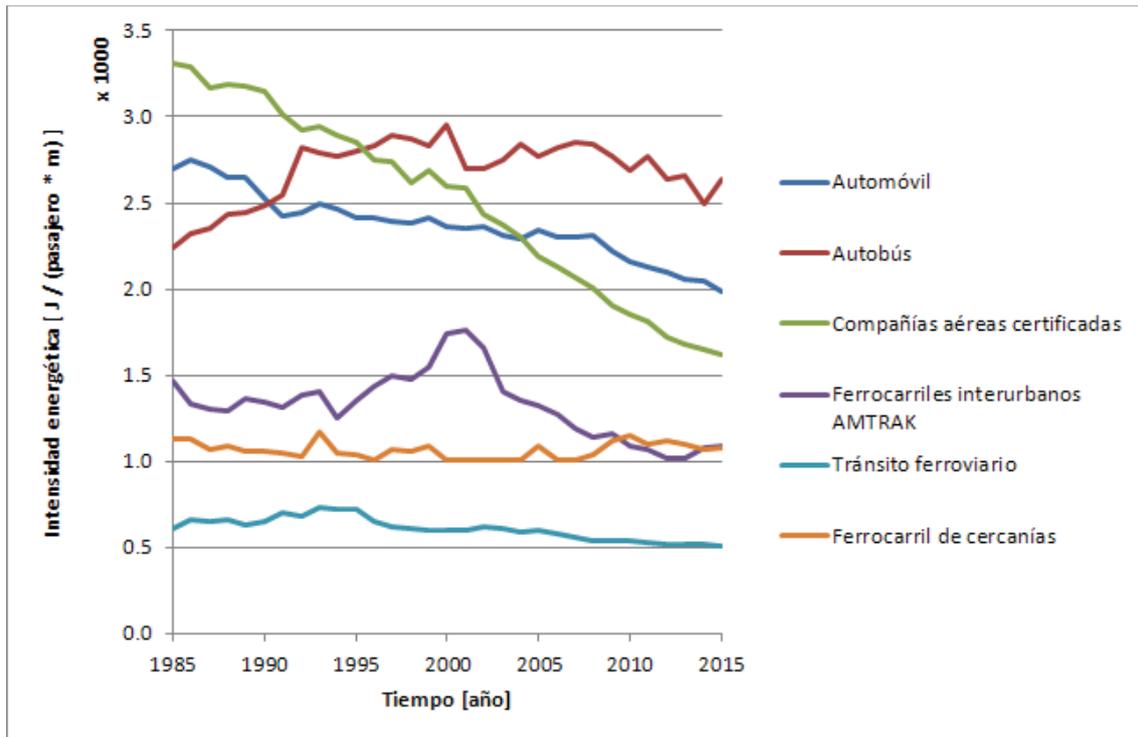


Ilustración 1. Evolución de la intensidad energética de los medios de transporte (Williams, 2017)

Analizando la gráfica anterior se pueden obtener algunas conclusiones interesantes que se detallan aquí:

- El automóvil es cada vez más eficiente debido a las mejoras tecnológicas de las últimas décadas que permiten un menor consumo. A su vez supera en eficiencia energética al autobús probablemente debido a que la mayor utilización del automóvil ha provocado una reducción en el número de pasajeros que usan el autobús, incrementando así su IE.
- El transporte aéreo ha mejorado mucho su IE debido a los avances tecnológicos y a los nuevos sistemas de gestión de reservas que permiten un mayor aprovechamiento de las plazas de los aviones. Pese a la gran mejora conseguida, el transporte por avión tiene una IE limitada debido al propio principio de funcionamiento de los aviones: para transportar un mayor peso se requiere una mayor sustentación, para conseguir una mayor sustentación se requiere una mayor velocidad, con una mayor velocidad se ha de vencer una mayor resistencia del aire y para vencer esta resistencia las turbinas deben entregar una mayor potencia, lo que se traduce en un mayor consumo energético que aumenta de manera proporcional al peso elevado a 1.5, mientras que tanto en el ferrocarril como en el transporte por carretera el consumo energético es proporcional al peso.
- Por último, se puede observar cómo el modo con la menor IE es el ferrocarril, siendo actualmente aproximadamente la mitad de la IE del automóvil, dicho de otro modo, el ferrocarril permite transportar a la misma cantidad de pasajeros la misma distancia que el automóvil, pero consumiendo la mitad de energía para ello.

Es exactamente por esta característica de eficiencia que la Unión Europea ha decidido apostar de una manera firme por el transporte por ferrocarril como se puede observar en el extracto del libro blanco del año 2011 que se muestra a continuación:

(3) Intentar transferir a otros modos, como el ferrocarril o la navegación fluvial, de aquí a 2030, el 30 % del transporte de mercancías por carretera, y para 2050, más del 50 %, apoyándose en corredores eficientes y ecológicos de tránsito de mercancías. Para cumplir este objetivo también será preciso desarrollar la infraestructura adecuada.

(4) Para 2050, completar una red europea de ferrocarriles de alta velocidad. Triplicar la longitud de la red existente de ferrocarriles de alta velocidad para 2030 y mantener una densa red ferroviaria en todos los Estados miembros. En 2050, la mayor parte del transporte de pasajeros de media distancia debería realizarse por ferrocarril.

...

(6) De aquí a 2050, conectar todos los aeropuertos de la red básica a la red ferroviaria, preferiblemente de alta velocidad; garantizar que todos los puertos de mar principales estén suficientemente conectados con el sistema ferroviario de transporte de mercancías y, cuando sea posible, con el sistema de navegación interior.

Extraído de (European Commission, 2011)

Pasando al ámbito estatal, se puede observar en las gráficas siguientes cómo el tráfico por ferrocarril tanto de pasajeros como de mercancías muestra una tendencia ascendente estable durante los últimos años:

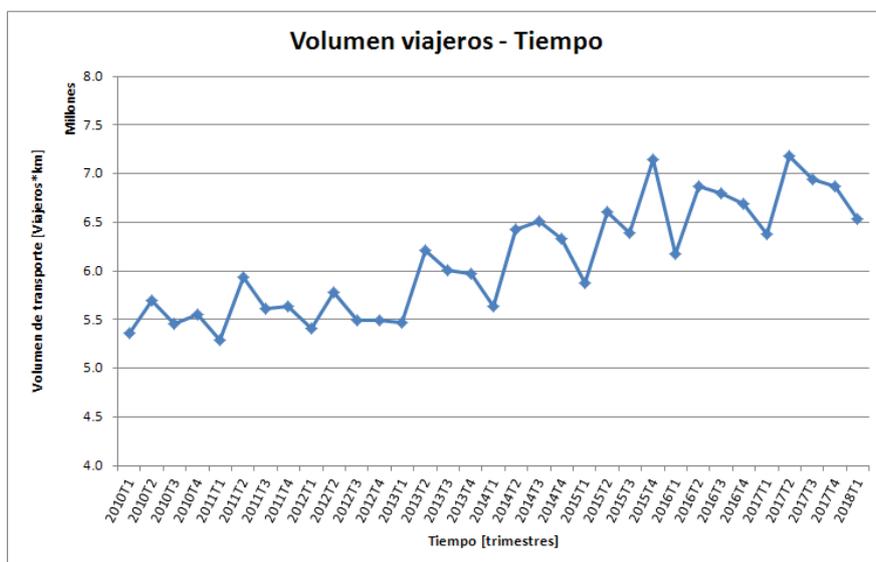


Ilustración 2. Evolución del volumen de viajeros en España

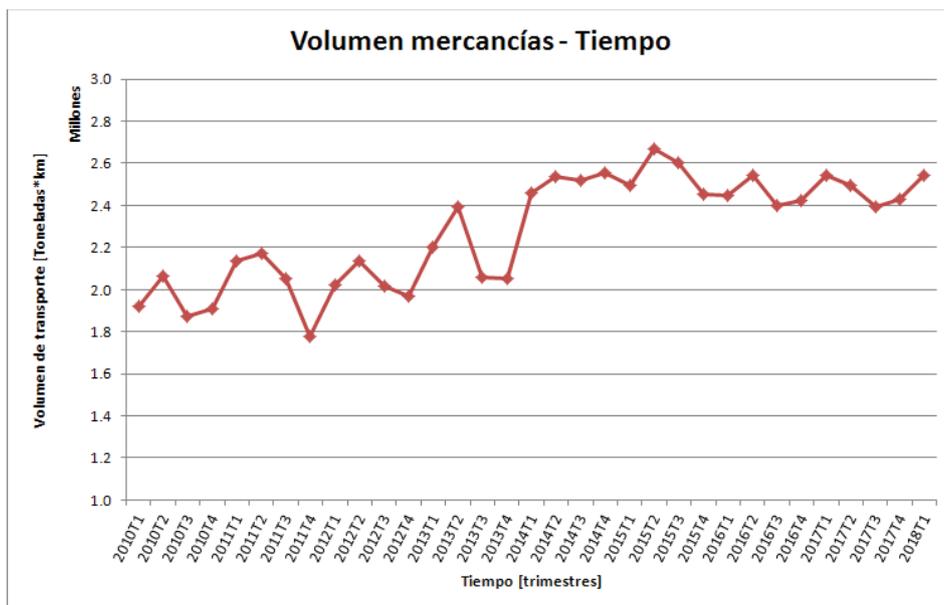


Ilustración 3. Evolución del volumen de mercancías transportadas en España

Además, también se ha incrementado la infraestructura del ferrocarril en España en los últimos años:

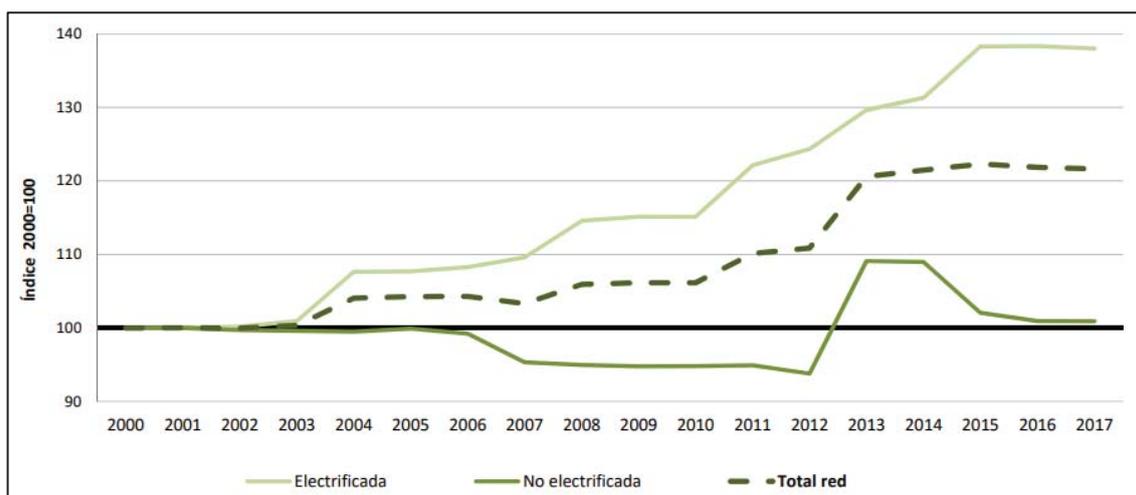


Ilustración 4. Evolución de la longitud de la red de ADIF por tipo de electrificación (OTLE, 2018)

En la gráfica anterior, el pequeño escalón que aparece entre los años 2012 y 2013 se debe a la inclusión de la red ferroviaria de vía estrecha del norte de España (FEVE) en las estadísticas y no a un incremento real de la infraestructura de vía, aun así, teniendo en cuenta este dato, se observa un incremento de la infraestructura de vía de un 16% entre los años 2000 y 2015 y un cambio en la tipología de vía incrementando aún más la presencia de las vías electrificadas.

A modo de pequeño resumen se puede concluir que el ferrocarril es un modo de transporte eficiente y cuyo uso se promociona con éxito (al menos en la Unión Europea). Dicho esto, para incrementar la presencia del ferrocarril una de las acciones necesarias es, como se dice en el punto 3 del extracto anterior, el desarrollo de la infraestructura necesaria. En el caso del ferrocarril esta infraestructura se traduce en la construcción de vías férreas entre los diferentes destinos a conectar (partes de una gran población, poblaciones entre sí, poblaciones con puertos o aeropuertos, etc.).

Impacto ambiental del ferrocarril

Las vías férreas generan una serie de impactos ambientales notables en su entorno que se pueden dividir en las siguientes categorías:

- Impacto geomorfológico: la construcción de vías férreas altera visiblemente el relieve y la destrucción de la vegetación puede provocar desprendimientos por la pérdida de la función estructural de las raíces.
- Impacto hidrológico y geológico: se puede producir contaminación del agua y el suelo cercanos por vertidos de contaminantes tanto durante la construcción como durante la operación de la vía.
- Impacto acústico y vibratorio: la construcción y la explotación de la vía férrea produce invariablemente vibraciones y ruidos que pueden llegar a ser muy molestos para las personas y/o los animales.

Es justamente en este último impacto en el que se enfoca el presente trabajo, el impacto acústico y vibratorio del ferrocarril no es un tema menor ya que puede provocar graves molestias y problemas de salud en los habitantes cercanos que además verían reducido el valor de sus viviendas por la presencia de los ruidos y vibraciones del ferrocarril mermando a su vez su capacidad para cambiar de vivienda.

El ruido y las vibraciones

La vibración se define según la Real Academia de Ingeniería cómo:

Tipo de movimiento oscilatorio alrededor de una posición de equilibrio que aparece de forma natural en los cuerpos deformables, tanto tras liberarlos de la carga (vibraciones libres) como cuando se aplica una carga oscilante (vibraciones forzadas).

(Real Academia de Ingeniería, 2019)

En este caso el movimiento oscilatorio es el de las partículas de los distintos sólidos que componen el terreno, la infraestructura de la vía y los edificios circundantes.

El impacto acústico (ruido) y las vibraciones son de naturaleza similar pero lo suficientemente diferentes para que se estudien por separado. Como características comunes se pueden destacar las siguientes:

- Su origen: el origen de ambos fenómenos es el paso del tren por la vía.
- Su modo de propagación: ambos fenómenos se transmiten mediante ondas desde su emisor (la vía o el tren) hasta su receptor (personas o animales). El fenómeno ondulatorio tiene su origen en una vibración que genera oscilaciones en las partículas a su alrededor, que a su vez transmiten estas oscilaciones a sus partículas vecinas y así sucesivamente. La principal característica de las ondas es que permiten la transmisión de energía, las vibraciones o sonido llegan del emisor al receptor, sin transmisión de materia, ya que las partículas que transmiten la energía están oscilando alrededor de una posición de equilibrio con lo cual su desplazamiento neto es nulo.

Y en cuanto a las diferencias se tienen:

- Su medio de propagación: para el ruido el medio de propagación es el aire (una mezcla de gases) así que las ondas transmitidas serán longitudinales de presión, además se trata de un medio prácticamente homogéneo. Por otra parte para las vibraciones el medio de propagación es la superestructura de la vía, el terreno y la estructura de los edificios receptores un medio heterogéneo donde además de las ondas longitudinales aparecen también ondas transversales debido a la diferencia fundamental entre los fluidos y los sólidos: mientras que los fluidos sólo se oponen a los cambios de volumen, los sólidos se oponen a los cambios de volumen y de forma, esta oposición a los cambios de forma (medida a través del módulo de cizalladura) es la que provoca la generación de ondas transversales en el material. Además, por último, aparecen en la interfase entre los dos medios las llamadas ondas de Rayleigh que son ondas de superficie que se propagan de manera muy eficiente.
- Su frecuencia: las frecuencias emitidas en ambos fenómenos son similares (se recuerda que ambos fenómenos comparten origen) sin embargo el aire es un medio poco disipativo con lo cual permite la propagación de las altas frecuencias del espectro de emisión con lo cual el espectro transmitido contiene frecuencias en todo el rango emitido, justamente el fenómeno contrario ocurre en el terreno que (habitualmente) es altamente disipativo con lo cual las componentes de alta frecuencia emitidas son absorbidas por el material a pocos metros de la vía quedando sólo las componentes de baja frecuencia cuando las ondas llegan al receptor.
- Receptores y percepción: los humanos no perciben de igual modo el ruido acústico y las vibraciones. Primeramente, porque se reciben por canales sensoriales distintos: el ruido se recibe a través del oído y las vibraciones se reciben a través del tacto (aunque el oído interno toma parte en el proceso por contar con sensores que afectan al equilibrio). Además, las frecuencias que se consideran molestas son diferentes para ambos fenómenos: para el ruido las frecuencias más molestas están entre 1000 y 5000 Hz (sonidos agudos) mientras que para las vibraciones este rango se sitúa entre 1 y 100 Hz. Es por esto que, para el análisis de estos fenómenos se utilizan ponderaciones que emulan la percepción humana. Por último, el ruido sólo afecta a los seres vivos mientras que las vibraciones, dependiendo de su magnitud, pueden afectar también a la seguridad e integridad de las estructuras.

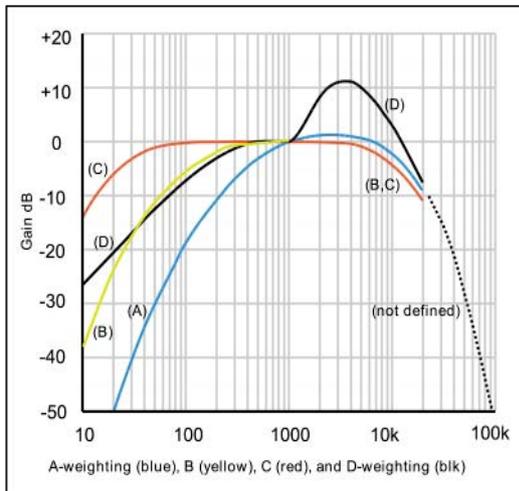


Ilustración 5. Ponderaciones habituales usadas en el análisis de ruido (Lindosland, 2019)

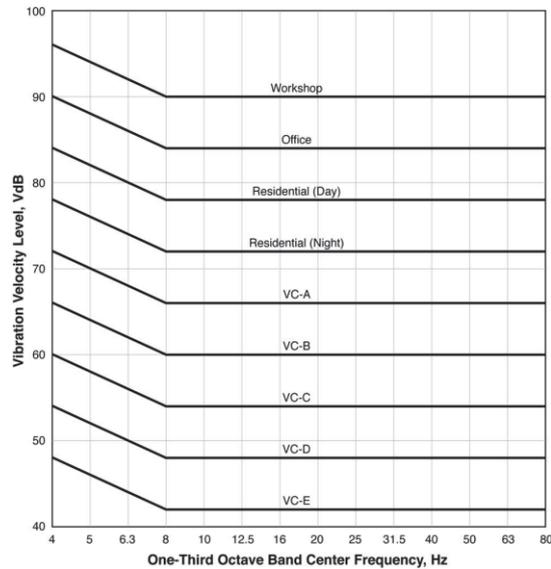


Ilustración 6. Ponderación utilizada en EEUU para el análisis de vibraciones (Hanson, Ross, D.A., & Harris, 2012)

Cabe añadir que las vibraciones, al llegar a la estructura receptora, pueden generar ruido aéreo de nuevo dentro de la estructura al vibrar los muros y tabiques del edificio, que actúan de forma efectiva como grandes altavoces, este fenómeno recibe el nombre de “ruido estructural originado por vibraciones” (GBN por sus siglas en inglés) y puede llegar a ser mucho más molesto que las propias vibraciones.

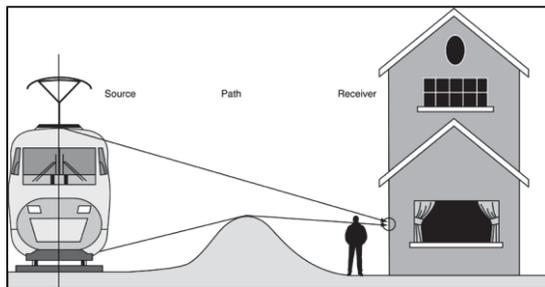


Ilustración 7. Esquema del mecanismo de transmisión de ruido aéreo (Hanson, Ross, D.A., & Harris, 2012)

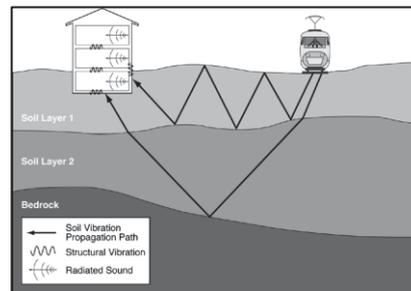


Ilustración 8. Esquema del mecanismo de transmisión de vibraciones (Hanson, Ross, D.A., & Harris, 2012)

Se pasa ahora a definir el origen de las vibraciones, que se puede entender tomando un enfoque dinámico desde el punto de vista de la vía como una serie de cargas móviles transitorias, estas cargas, sólo por su movimiento, ya generarían ondas vibratorias en el terreno, pero esta causa se ve intensificada por los cambios en la estructura de la vía que modifican su rigidez vertical, estos cambios pueden ir desde el cambio de rigidez que provoca el paso de tramos sobre balasto a tramos en placa hasta el cambio provocado por pasar de estar la rueda sobre una traviesa a estar entre dos traviesas, pasando por fenómenos puntuales como los desvíos o las juntas de vía.

Además, las irregularidades del rail y la rueda provocan, en la zona de contacto entre ambos, fluctuaciones (que se pueden considerar aleatorias) en la carga transmitida al terreno.

Hasta ahora se ha hablado de forma casi indistinta de las vibraciones y el ruido como tipos de contaminación ambiental, de hecho, se suelen presentar de forma conjunta al analizar el impacto ambiental de proyectos que generen este tipo de contaminación, si bien se han expuesto sus similitudes y diferencias.

Ahora bien, hay una diferencia entre estos dos fenómenos que destaca sobre el resto: el medio de propagación. Por una parte, el medio de propagación del ruido es el aire, un material conocido y estudiado durante siglos con propiedades definidas y modelos de comportamiento contrastados. Por otra parte, el medio de propagación de las vibraciones es el terreno, formado por subdominios de materiales como arcilla, arena o roca entre otros cuyas propiedades y modelos de comportamiento no están completamente determinados y cuyas fronteras de separación ni están bien determinadas ni son fácilmente identificables.

Esta característica de las vibraciones no se puede pasar por alto ya que es crucial en la determinación del alcance de la contaminación, una configuración de las capas del terreno favorable, por ejemplo, con capas de roca poco profundas que permitan una buena propagación de las ondas de presión, puede aumentar enormemente el alcance de las vibraciones y su magnitud, generando mayores molestias entre los habitantes de la zona.

Hay una serie de características que propician la aparición de problemas vibratorios:

- Peso del material rodante: a mayor peso, mayor carga transmitida al terreno y mayor es el impacto vibratorio.
- Velocidad: un aumento en la velocidad provoca un aumento en las cargas dinámicas en tramos curvos debido a la necesidad de compensar la carga para negociar la curva y en los tramos rectos debido al movimiento de lazo.
- Cercanía edificios: las vibraciones se propagan en forma de onda sufriendo los fenómenos de atenuación y absorción al alejarse de la fuente, es inmediato suponer que los edificios más cercanos a las vías serán más propensos a verse afectados por problemas vibratorios.
- Puentes vibratorios: del mismo modo que un elemento metálico que perfora un aislamiento térmico puede crear un puente térmico e inutilizar totalmente el aislamiento, hay ciertos fenómenos que pueden actuar como “puente vibratorio” y facilitar la transmisión de vibraciones grandes distancias. Por ejemplo, una causa habitual de este fenómeno podría ser una estratificación del terreno favorable a las vibraciones, con capas poco profundas de roca que “atrapan” las ondas vibratorias cerca de la superficie impidiendo que se atenúen haciendo así que puedan transportarse una mayor distancia.
- Irregularidades en vía y rueda: en este caso se habla de las rugosidades y pequeñas imperfecciones presentes tanto en la vía como en las ruedas, que van desde la rugosidad superficial normal que pueda aparecer tanto en rueda como en rail hasta fenómenos como el desgaste ondulatorio o los planos de rueda, estas irregularidades en el soporte del tren se traducen en irregularidades en la carga transmitida al terreno generando problemas vibratorios.



Ilustración 9. Ejemplo de plano de rueda (Bobo11, 2019)

- Desvíos y juntas de vía: ciertos aparatos de vía puntuales como los desvíos o las juntas de vía (o soldaduras con recrecimientos en el carril continuo soldado) pueden generar un incremento sustancial en las vibraciones transmitidas al terreno actuando como perturbación de la vía, afortunadamente su efecto está limitado a la vecindad del punto donde se encuentra el aparato o la junta.
- Resonancias en receptor: una vez las vibraciones llegan al edificio receptor, se pueden ver amplificadas al excitar frecuencias de resonancia de forjados o muros de la estructura provocando así un aumento en su amplitud y la posible radiación de ruido aéreo al actuar estos forjados y paredes como grandes altavoces.

Por último, hay un factor más que puede afectar a las vibraciones propagadas por el paso del material rodante, se trata de la velocidad de propagación del sonido en el material. En el caso del terreno, considerando unas propiedades isotrópicas medias de un terreno de relleno habitual se tiene que la velocidad de las ondas longitudinales de presión en este es:

$$c_p = \sqrt{\frac{\text{módulo de compresibilidad}}{\text{densidad}}} = \sqrt{\frac{K}{\rho}} = \sqrt{\frac{25 \text{ (MPa)}}{1800 \text{ (kg/m}^3)}} = 424 \text{ (km/h)}$$

Ecuación 2. Cálculo de la velocidad de propagación de las ondas longitudinales en un material

Siendo la velocidad de los demás tipos de onda mecánica (transversal, Rayleigh) más baja que la longitudinal de presión de acuerdo a la siguiente gráfica.

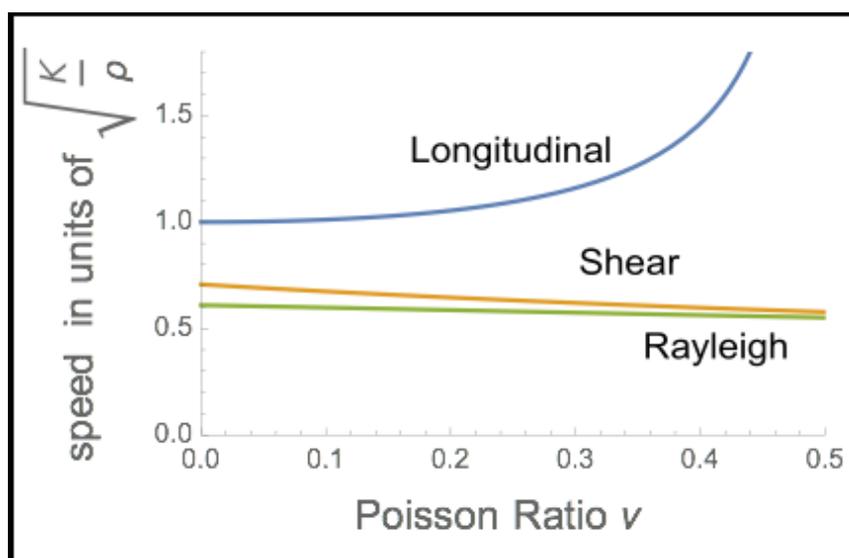


Ilustración 10. Comparación de velocidades de ondas elásticas (NoahMitchell, 2019)

Se puede aproximar la velocidad más baja, la de las ondas tipo Rayleigh a un 60% de la velocidad c_p calculada anteriormente quedando así $c_r = 254 \text{ (km/h)}$, velocidad cercana a las velocidades actuales de los trenes de alta velocidad siendo así probable la generación de una onda de choque vibratoria en el terreno, con un principio físico similar a la onda de choque sónica que se genera en los aviones al alcanzar la velocidad del sonido, con efectos nefastos para la contaminación por vibraciones debido al súbito aumento de la amplitud de estas pudiendo llegar a valores que multiplican por 10 el valor esperado sin el fenómeno de choque. (V.Krylov, 1995)

Precisamente por las razones expuestas anteriormente, en el presente trabajo lo que se realiza es un estudio de la propagación de las vibraciones desde la vía férrea hasta los edificios circundantes, investigando los factores que mejoran o empeoran la transmisión de las vibraciones, analizando además algunas de las medidas correctoras aplicables.

Además, el análisis de la propagación de las vibraciones es un problema cuya solución no está aún del todo establecida tal y como se cita textualmente de (Hanson, Ross, D.A., & Harris, 2012):

“Developing detailed projections of ground-borne vibration is considerably more complex than developing detailed projections of airborne noise. The vibration projection procedure is not only complex but also has not yet been standardized.”

Sumado a esto, se ha investigado en la base de datos de normas de AENOR y no se ha encontrado ninguna norma que estandarice el proceso de cálculo de los fenómenos mencionados.

Con lo cual se espera que cualquier conclusión que se pueda extraer del presente trabajo y contribuya a la estandarización de este tipo de estudios pueda ser útil para el confort de los ciudadanos que vivan cercanos a futuras vías de ferrocarril.

Para el estudio se utilizará el método de los elementos finitos cuyo funcionamiento se explicará brevemente más adelante. Además, se explicará el planteamiento del problema y se tomarán las simplificaciones necesarias para que el análisis sea realizable y a su vez permita obtener resultados relevantes.

Objetivo del trabajo

El objetivo del trabajo es doble, por una parte, el primer objetivo es la generación de un procedimiento para el análisis de la propagación de vibraciones de origen ferroviario mediante el método de los elementos finitos. Y, por otra parte, el segundo objetivo es el uso de este método para la evaluación de la efectividad de distintas medidas usadas habitualmente para la corrección de los problemas vibratorios.

Definición del problema

El problema propuesto es el estudio del sistema formado por el tren, la infraestructura de vía y los edificios circundantes con el fin de lograr predecir los valores de vibración esperados en estos edificios a causa del paso de los trenes por la vía. En este caso se trata de un tramo en túnel de ferrocarril cercano a un edificio de varias alturas.

El modelo matemático del problema

El sistema se estudia a través de un modelo matemático de elementos finitos que se puede resumir en el siguiente esquema:

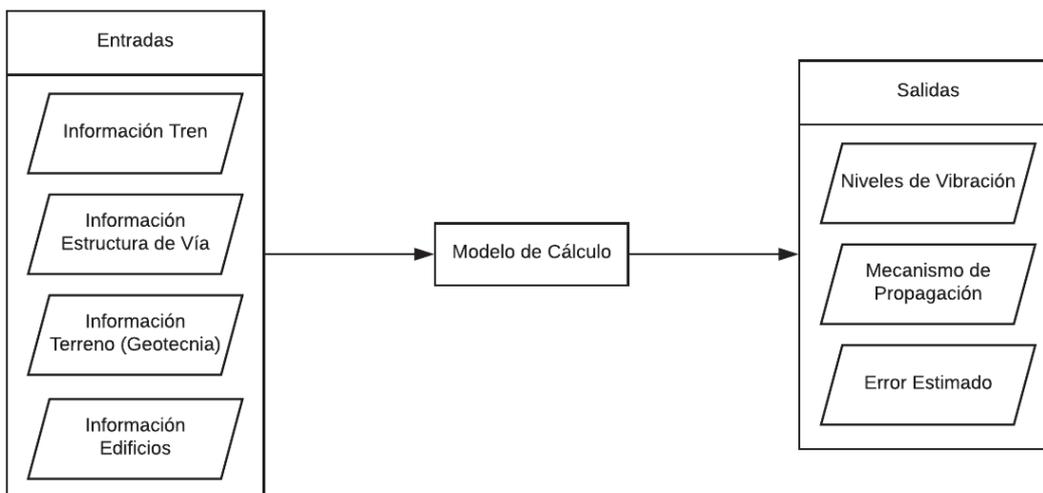


Ilustración 11. Esquema del modelo del sistema

El modelo matemático que se realiza del sistema debe ser lo suficientemente sencillo para que el tiempo de cálculo no sea excesivo y para evitar que la saturación de parámetros impida identificar las relaciones entre ellos. Además, el modelo debe ser una representación fiel del sistema real con el fin de que los resultados obtenidos puedan ser utilizados como predicción.

Se observa aquí pues que se debe tomar una solución de compromiso entre precisión del modelo y factibilidad del análisis.

El sistema real del problema es extremadamente complejo como para ser modelado y simulado ya que debería incluir:

- Un modelo de todo el tren que capturase perfectamente su comportamiento dinámico.

- El contacto rueda raíl para tomar en cuenta cómo se transmite la carga del tren a la vía.
- La infraestructura de la vía incluyendo todas las capas que la forman y además modelando correctamente su comportamiento dinámico, lo cual es altamente complejo para elementos como el balasto formado por elementos de formas y tamaños variados en contacto.
- Un modelo del terreno sobre el que descansan tanto la vía como los edificios a estudiar, incluyendo tanto su geometría como las propiedades geotécnicas de los materiales que lo forman. Este sería el paso más complejo de acometer ya que, en general, la geotecnia del terreno no es conocida y los estudios que se pueden acometer actualmente dan información parcial (en puntos o zonas concretas) del mismo. Además, el comportamiento dinámico de los materiales que conforman el terreno (arcillas, arenas, rocas) es poco conocido y sus propiedades pueden variar mucho en función de parámetros como la humedad o la granulometría de sus componentes.
- Los edificios a estudiar incluyendo todos sus elementos y materiales.
- Otros elementos que puedan afectar a la propagación de las vibraciones tales como instalaciones subterráneas, otros edificios, etc.

La cantidad de tiempo requerida para el modelaje y el cálculo de un modelo como el definido es impracticable. Es por esto que se procede a realizar las siguientes simplificaciones:

1. La primera y más importante de las simplificaciones es el paso del modelo 3D al modelo 2D. La realización de un modelo 3D del problema propuesto es geoméricamente sencilla porque se trataría básicamente de generar una sección en 2D y extruirla en la dirección perpendicular al plano como se muestra en imagen inferior. El problema que tiene este planteamiento es la carga computacional que supone el cálculo de un modelo en 3D el cual no solo multiplica la cantidad de nodos del modelo aproximadamente por el espesor de extrusión dividido por el tamaño medio del elemento en la dirección de extrusión, sino que además añade un grado de libertad más al análisis, el desplazamiento de los nodos en la dirección de extrusión. Es por esto que se procede a simplificar el modelo tomándolo como una sección bidimensional del modelo 3D y asumiendo que la geometría es constante en la dirección perpendicular al plano del modelo.

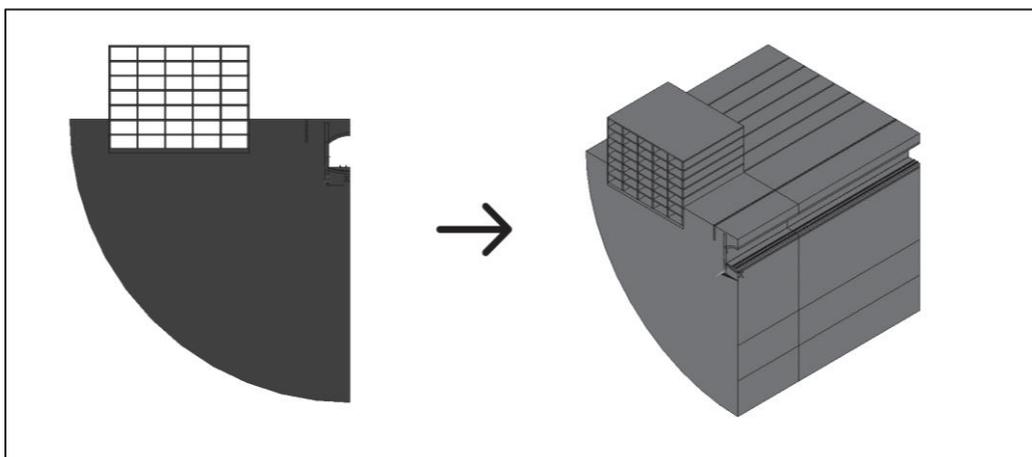


Ilustración 12. Paso de la sección 2D al modelo 3D por extrusión

Con este paso, el problema pasa a ser un problema de elasticidad bidimensional, que se tratará como un caso de deformación plana debido a la naturaleza geométrica del problema, que tiene una dimensión (la dimensión longitudinal a la vía) mucho mayor que las otras dos. Además, se toma la carga provocada por el tren como una carga lineal a lo largo del rail justificando la hipótesis de deformación plana. Este planteamiento coincide con el realizado en (Real, Zamorano, Ribes, & Real, 2014).

Esta simplificación del modelo conllevará una simplificación en el modelo del edificio receptor pasando a ser 2D, lo cual equivale a considerarlo como una estructura muy larga en la dirección longitudinal de la vía esta suposición aleja el modelo de la realidad introduciendo un error que se tendrá que tener en cuenta.

Por último, este cambio hace que el estudio del problema no se plantee igual con el consiguiente cambio en los resultados obtenidos. Aun así, según aparece en (Yang, Liang, Hung, & Wua, 2017) el estudio del problema vibratorio en 2D es similar al estudio del problema vibratorio en 2.5D (ver planteamiento en el artículo) cuando la velocidad de paso del tren tiende a infinito y sus resultados son siempre más desfavorables que los análisis realizados con el tren a menor velocidad. Con lo cual se puede afirmar que el análisis 2D realizado cometerá un error del lado de la seguridad.

2. Se asumirá la simetría del dominio espacial. Como se puede apreciar en la Ilustración 12, la sección 2D sólo muestra la mitad del túnel, esto es porque en el modelo se asume que la sección objeto de estudio es simétrica por el plano medio vertical del túnel, es decir, tiene geometría simétrica y condiciones de contorno simétricas lo cual permite aplicar una condición de contorno especial en ese plano de simetría y calcular solo media sección ahorrando así tiempo de cálculo y recursos computacionales.
3. El comportamiento dinámico del tren y su interacción con la infraestructura se resumirá en una fuerza aplicada sobre la vía cuyo cálculo se detallará más adelante.
4. El terreno, que debería ser modelado como un semiespacio prácticamente infinito debe ser truncado a un dominio finito por la naturaleza del método de cálculo (elementos finitos) y por los límites del programa de cálculo (ANSYS Student), este truncamiento del dominio da lugar a problemas para la correcta simulación de la propagación de las vibraciones que se explicarán en detalle en un apartado posterior.
5. Todos los materiales que conforman el sistema se considerarán elásticos y lineales con tal de poder aplicar los métodos de cálculo descritos en el apartado “Descripción del sistema dinámico”.

Descripción del método de los elementos finitos (MEF)

El método de los elementos finitos es un método general para la resolución numérica aproximada de ecuaciones diferenciales en dominios delimitados, esto se consigue mediante la división o de éstos en subdominios llamados elementos (definidos por puntos llamados nodos) dentro de los cuales se asume la forma que tendrá la solución, definiendo unas funciones especiales llamadas funciones de forma, y se aproxima ésta para los nodos extendiéndola después a todo el elemento mediante interpolación a

través de las funciones de forma construyendo así elemento a elemento la aproximación a la solución para todo el dominio.

Este método permite la resolución aproximada de ecuaciones diferenciales de muy diversa índole, desde análisis de campos de tensiones en estructuras hasta campos electromagnéticos en aparatos electrónicos pasando por transmisión de calor o mecánica de fluidos. En este caso concreto el fenómeno físico que se va a estudiar es la vibración y su relación con las fuerzas que lo provocan, por lo tanto, la ecuación cuya solución se aproximará será la ecuación generalizada del movimiento mostrada a continuación en su forma ya discretizada:

$$[M] * \ddot{u} + [C] * \dot{u} + [K] * u = f$$

Ecuación 3. Ecuación generalizada del movimiento

Donde:

- $[M]$ es una matriz que representa la masa del sistema.
- $[C]$ es una matriz que representa el amortiguamiento viscoso (proporcional a la velocidad) del sistema.
- $[K]$ es una matriz que representa la rigidez del sistema.
- F es un vector que representa las fuerzas aplicadas al sistema.
- u , \dot{u} y \ddot{u} son los vectores los desplazamientos, velocidades y aceleraciones, correspondientemente, de los distintos puntos del sistema discretizado, los nodos.

Esta ecuación es la que permite relacionar las causas del movimiento (las fuerzas, provocadas por el paso de los trenes) con el movimiento mismo (los desplazamientos, la vibración en el edificio).

Se busca concretar ahora un poco más la ecuación acercándose al análisis que se va a realizar, el análisis en régimen estacionario senoidal, es decir, un modelo en el cual las entradas (condiciones de contorno) son señales senoidales, que pueden ser nulas como por ejemplo el desplazamiento de un nodo, y las salidas, los desplazamientos de los puntos, también lo son. Además, todas las señales intervinientes en el análisis tienen la misma frecuencia. Este régimen sólo se puede dar en sistemas mecánicos que sean lineales como el sistema objeto de estudio.

Una señal senoidal se puede expresar como la parte real de la siguiente expresión:

$$s(t) = A * e^{\omega * i * t + \varphi * i} = (A * e^{\varphi * i}) * e^{\omega * i * t}$$

La señal $s(t)$ tiene una amplitud A , una fase inicial φ y una frecuencia angular ω . Las derivadas de esta señal respecto al tiempo son sencillas de calcular:

$$\dot{s}(t) = (A * e^{\varphi * i}) * (\omega * i) * e^{\omega * i * t}$$

$$\ddot{s}(t) = (A * e^{\varphi * i}) * (-\omega^2) * e^{\omega * i * t}$$

Con esto la ecuación generalizada del movimiento queda del siguiente modo:

$$[M] * \ddot{u} + [C] * \dot{u} + [K] * u = f$$

$$\begin{cases} u = U * e^{\omega * i * t} \\ f = F * e^{\omega * i * t} \end{cases}$$

Dónde U y F son vectores constantes complejos que engloban la amplitud y la fase de las señales de fuerzas y desplazamientos. Se continua con el desarrollo de la ecuación sustituyendo estos dos vectores:

$$\begin{aligned}
 [M] * U * (-\omega^2) * e^{\omega * i * t} + [C] * U * (\omega * i) * e^{\omega * i * t} + [K] * U * e^{\omega * i * t} &= F * e^{\omega * i * t} \\
 ([M] * (-\omega^2) + [C] * (\omega * i) + [K]) * U * e^{\omega * i * t} &= F * e^{\omega * i * t} \\
 ([M] * (-\omega^2) + [C] * (\omega * i) + [K]) * U &= F
 \end{aligned}$$

Por último se aplica una pequeña modificación a la ecuación ya que, si bien las matrices de masa ([M]) y de rigidez ([K]) son relativamente directas de calcular. La matriz de amortiguamiento viscoso ([C]) no lo es, y se debe tomar una decisión con respecto a su método de cálculo. En este caso se ha decidido utilizar el llamado factor de pérdidas del material o “loss factor” que se incluye en el modelo como se explica a continuación.

Se parte de la consideración de que la relación entre la tensión aplicada sobre un material y su deformación es una variable compleja, es decir, se considera que el módulo elástico o módulo de Young es una variable compleja del siguiente modo:

$$E^* = E_{Re} + i * E_{Im}$$

Ecuación 4. Módulo de Young complejo

Dónde:

- E_{Re} es lo que se llama módulo de almacenamiento ya que representa la capacidad de almacenar energía elástica del material.
- E_{Im} es lo que se llama módulo de pérdidas y representa la capacidad de disipar energía mecánica del material.

El factor de pérdidas se define simplemente como la relación entre estos dos módulos y es un parámetro del cual se dispone de datos para los distintos materiales:

$$\eta = \frac{E_{Im}}{E_{Re}}$$

$$E^* = E_{Re} * (1 + \eta * i)$$

Tomando E_{Re} como el módulo de Young clásico se tiene:

$$E^* = E * (1 + \eta * i)$$

Y sabiendo la relación siguiente:

$$[K] = E^* * [mat]$$

Dónde [mat] es una matriz dependiente del coeficiente de Poisson del material. Se sustituye en la ecuación del movimiento armónico, suprimiendo el amortiguamiento viscoso:

$$\begin{aligned}
 ([M] * (-\omega^2) + [K]) * U &= F \\
 ([M] * (-\omega^2) + E^* * [mat]) * U &= F \\
 ([M] * (-\omega^2) + E * (1 + \eta * i) * [mat]) * U &= F \\
 ([M] * (-\omega^2) + (1 + \eta * i) * [K]) * U &= F
 \end{aligned}$$

Ecuación 5. Ecuación del movimiento modificada

La ecuación resultante es una ecuación algebraica de coeficientes complejos que permite obtener las amplitudes y fases de los desplazamientos conociendo las fuerzas aplicadas y las características mecánicas del sistema, que como se puede observar dependen de la frecuencia. Esta es la ecuación que se encargará de resolver el motor de cálculo del programa utilizado, el ANSYS. Cabe mencionar que el factor de pérdidas puede depender también de la frecuencia pese a que, en este caso, se ha considerado constante con el fin de acotar la complejidad del estudio.

Descripción del sistema dinámico

Considerando que los materiales que componen el sistema trabajan en régimen elástico y lineal y que las deformaciones del sistema son pequeñas en relación con sus dimensiones (principio de pequeñas deformaciones), se pueden tomar las matrices de coeficientes ($[M]$, $[C]$ y $[K]$) como constantes. Con esta simplificación, la ecuación estará representando un sistema lineal que se puede esquematizar del siguiente modo:

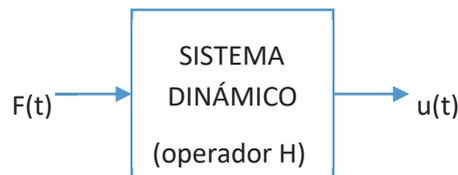


Ilustración 13. Esquema de caja negra del sistema dinámico

En el esquema mostrado el sistema dinámico formado por la vía, la superestructura, el terreno, el edificio y demás elementos quedan reducidos a un sistema tipo “caja negra” donde se tienen como entradas unas señales de fuerza que son transformadas por el sistema dinámico para obtener como salidas unas señales de desplazamiento (de las cuales se pueden derivar velocidades y aceleraciones).

Volviendo a tomar el concepto de sistema lineal, las propiedades de este tipo de sistemas interesantes para el presente estudio son las siguientes:

1. Es de aplicación el principio de superposición. Esta es una característica definitoria de los sistemas lineales que lo que indica es que se cumple la siguiente relación:

$$\begin{aligned} \text{si } u_1(t) &= H\{F_1(t)\} \\ \text{y } u_2(t) &= H\{F_2(t)\} \\ \text{entonces } u_1(t) + u_2(t) &= H\{F_1(t) + F_2(t)\} \end{aligned}$$

Además, el principio de superposición también indica que se cumple la siguiente relación:

$$\begin{aligned} \text{si } u_1(t) &= H\{F_1(t)\} \text{ y } A \text{ es un escalar} \\ \text{entonces } A * u_1(t) &= H\{A * F_1(t)\} \end{aligned}$$

Es decir, si se multiplica la señal de entrada por un escalar, la señal de salida será la misma que la que provocaba la señal anterior pero multiplicada por ese mismo escalar.

2. Si la entrada de un sistema lineal real es una función sinusoidal, su salida será también una función sinusoidal de la misma frecuencia, pero variando su amplitud y fase.

Estas propiedades permiten estudiar el sistema dinámico del siguiente modo. Se parte que se va a estudiar el sistema sólo con una entrada y una salida y como entrada al sistema se tiene una fuerza sinusoidal de frecuencia f amplitud 1 y fase 0, se obtendría una salida que sería un desplazamiento

sinusoidal de frecuencia f , amplitud U y fase φ . Entonces, para esta frecuencia f , si la fuerza aplicada hubiese sido de amplitud 2 el desplazamiento obtenido hubiese sido de amplitud $2U$, del mismo modo si la fase de la fuerza aplicada hubiese sido α la fase del desplazamiento hubiese sido $\alpha+\varphi$.

Dicho esto, para cada frecuencia, con calcular una única vez la relación entre amplitud y fase de fuerza y amplitud y fase de desplazamiento es suficiente para definir completamente el sistema para esa frecuencia. A esta relación es a lo que habitualmente se llama función de respuesta en frecuencia o función de transferencia ya que es una función que define perfectamente la respuesta (salida) del sistema dinámico cuando es excitado (recibe una entrada) a una determinada frecuencia. Esta relación se definirá como:

$$H(f) = \frac{u(f)}{F(f)}$$

Ecuación 6. Definición de la función de transferencia

La división que aparece en la ecuación anterior se entiende como división de números complejos, se dividen las magnitudes y se restan las fases. La imagen siguiente muestra un ejemplo de cálculo de esta función de transferencia mostrando únicamente las magnitudes de los números complejos involucrados:

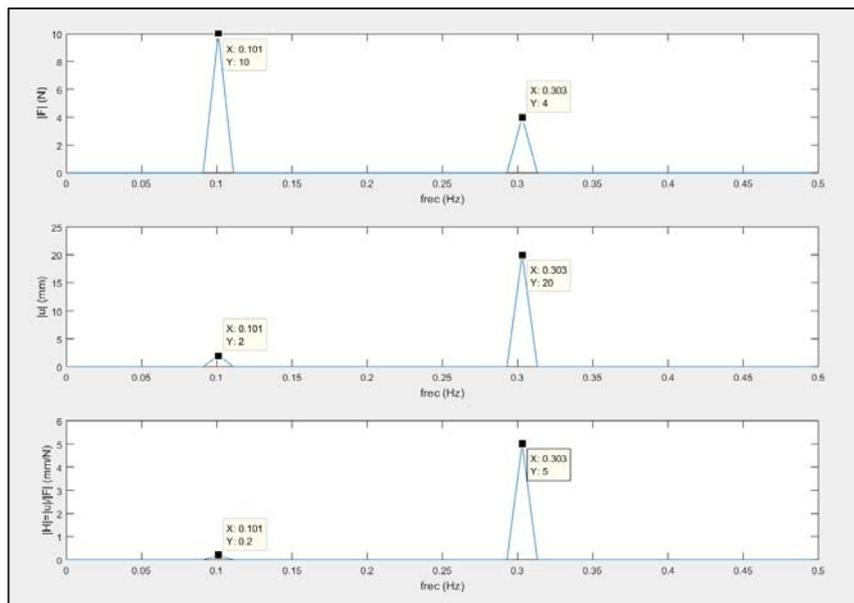


Ilustración 14. Ejemplo de función de transferencia

En la imagen anterior aparece, por ejemplo, un pico en la fuerza a 0.1 Hz de valor 10 N y un pico en la respuesta a la misma frecuencia de valor 2 mm, por lo tanto, la función de transferencia H para una frecuencia de 0.1 Hz tiene una magnitud de 0.2 mm/N (2/10). Cabe mencionar que, puesto que la excitación solo se aplica a 2 frecuencias (0.1 y 0.3 Hz), solo se obtiene información de la función de transferencia en estas 2 frecuencias, para el resto de frecuencias si se intenta obtener se llega a una indeterminación ya que se llega a la operación $u/F = 0/0$.

De esta información se concluye que, para definir completamente la función de transferencia de un sistema dinámico en un rango de frecuencias, se debe excitar y medir la respuesta para todos los

valores de este rango de frecuencias. Esta función de transferencia se intentará aproximar lo mejor posible analizando la respuesta a diferentes frecuencias dentro del rango de interés para nuestro modelo.

Cálculo de la fuerza aplicada

La fuerza aplicada sobre el modelo es un punto importante del cálculo ya que es el elemento que constituye el origen de las vibraciones y, por lo tanto, determinará la magnitud y distribución de las vibraciones.

En este caso, se ha considerado la fuerza del tren como una serie de cargas puntuales verticales que se desplazan a lo largo de la vía a velocidad constante. Como modelo de tren, se ha tomado la serie 4300 de FGV con un peso por eje de 75 kN y cuyos datos geométricos se pueden observar a continuación.

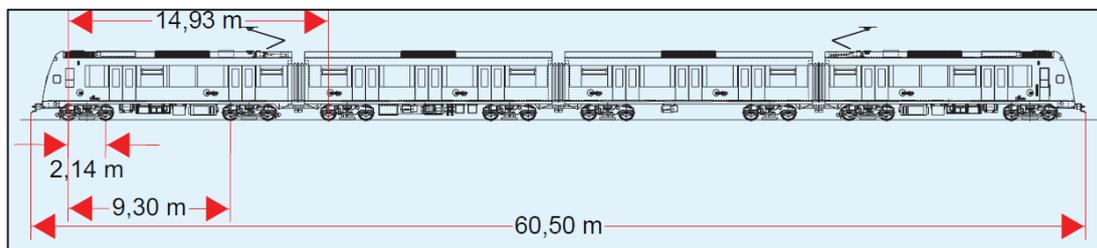


Ilustración 15. Datos geométricos serie 4300 FGV

Para el cálculo se ha considerado que la fuerza transmitida es igual a la carga por eje del tren con lo cual el tren de cargas correspondientes al tren expuesto en la Ilustración 15 se representa en la siguiente gráfica.

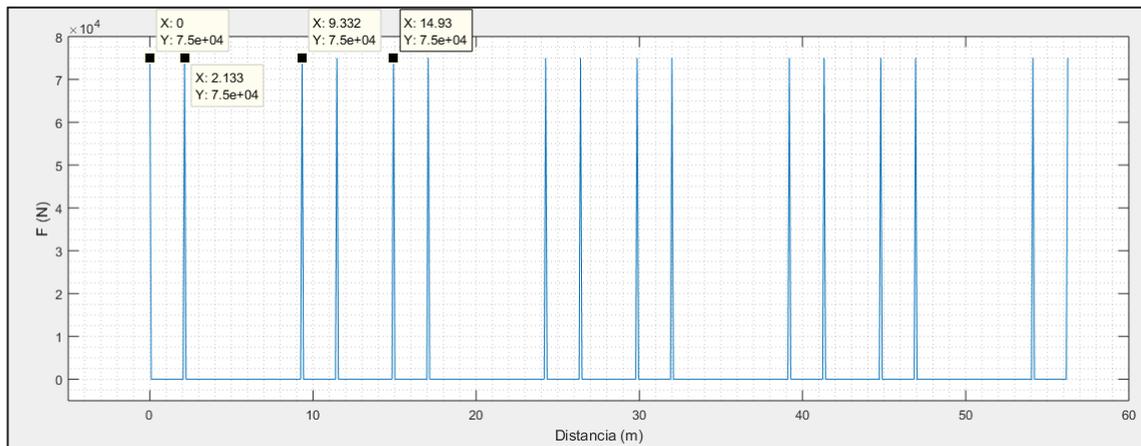


Ilustración 16. Gráfica F (dist)

Asumiendo que el tren se mueve a una velocidad constante de unos 80 km/h (22.22 m/s), para un punto fijo de la vía, la serie temporal de fuerza que recibe tendrá la siguiente forma:

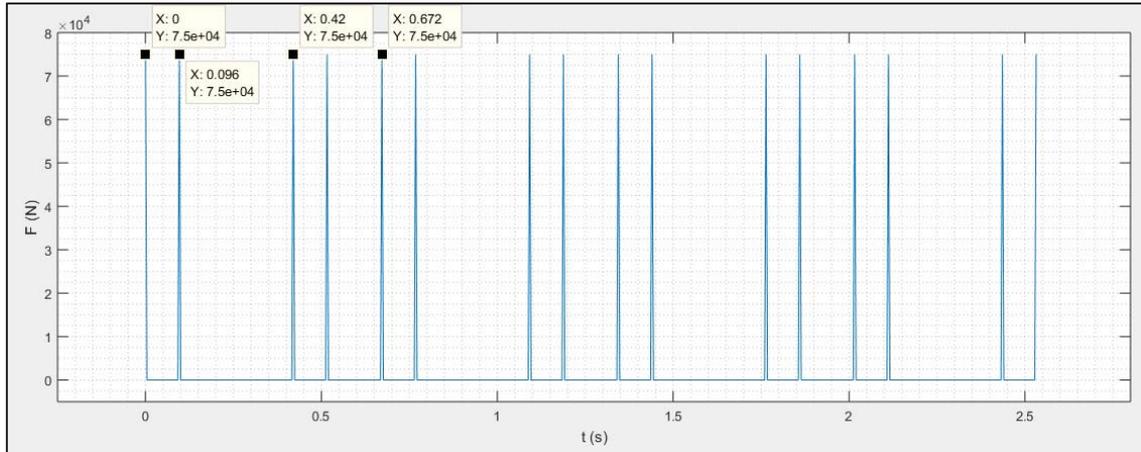


Ilustración 17. Gráfica $F(t)$

Que no es más que la gráfica anterior escalada en el eje de abscisa por un factor 22.22 (la velocidad del tren en m/s). Esta función se muestrea a una frecuencia determinada que se seleccionará mediante el teorema de Nyquist-Shannon para el muestreo de señales.

Este teorema indica que para obtener información en frecuencia de una señal hasta una frecuencia f a partir de una serie de muestras de esta misma señal, se deberá muestrear la señal a una frecuencia igual o superior al doble de f . Así pues, en este caso la máxima frecuencia de interés de la señal serán los 80 Hz (frecuencia máxima tomada en cuenta para el cálculo del índice de molestia), por lo tanto, se deberá muestrear la señal a un mínimo de 160 Hz. La frecuencia de muestreo elegida finalmente es de 250 Hz para así poder representar más fielmente el tren de impulsos.

Una vez muestreada la señal, se le aplica la transformada discreta de Fourier (algoritmo FFT) con una longitud de transformada de 2048 elementos (potencia de 2 para mejorar la velocidad del algoritmo FFT) que es equivalente a añadir ceros tras el último elemento hasta llegar a 2048 y luego hacer la DFT de este vector. Una vez obtenido su espectro de banda estrecha en frecuencia, se toman sólo los elementos entre 0 y $0.5 \cdot f$ Hz y la amplitud de estos valores (que eran complejos) se divide entre la longitud de la DFT y se multiplica por 2 para obtener la amplitud de las ondas senoidales que, sumadas, sintetizarían la señal original. Estas señales de fuerza serán las que se usarán como entrada para el cálculo de la aceleración en los receptores. En la Ilustración 18. Espectro en frecuencia de la señal de fuerza ilustración 18 se muestra el resultado de estas operaciones.

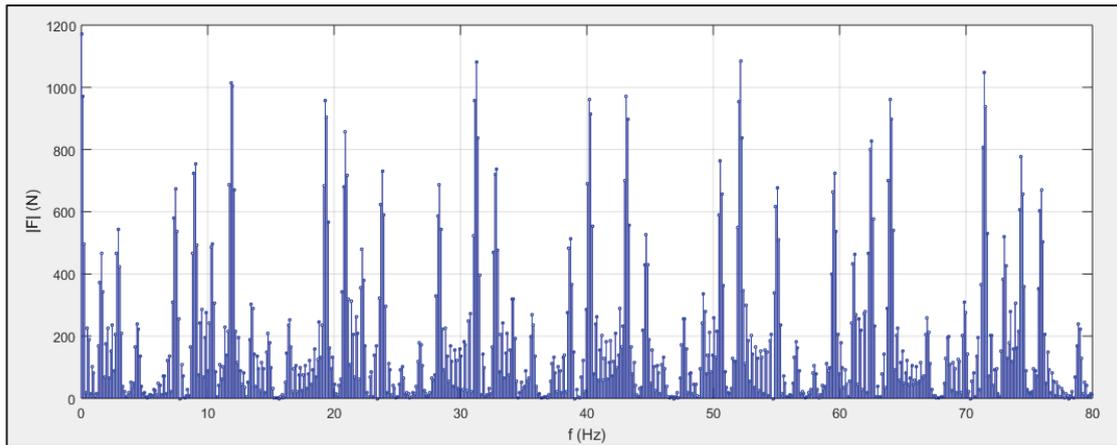


Ilustración 18. Espectro en frecuencia de la señal de fuerza

Proceso de cálculo completo automatizado

Una vez realizado el modelo completo incluyendo su geometría, mallado, fuerzas, condiciones de contorno y propiedades de materiales, se pasa al proceso de cálculo propiamente dicho. Para realizar un cálculo es suficiente con especificar el tipo de análisis, establecer las condiciones del mismo en el programa y ejecutarlo. Para nuestro caso, el análisis que se va a realizar es el análisis senoidal, que es un análisis dinámico con las peculiaridades explicadas en el apartado “Descripción del método de los elementos finitos (MEF)”, este análisis tan solo requiere, una vez construido el modelo dicho anteriormente, de la definición de una condición del cálculo, la frecuencia, una vez definido este parámetro, se puede calcular el modelo y obtener los resultados pertinentes. Para una frecuencia definida, al realizar el análisis se obtienen como resultados 2 campos de desplazamientos, uno que corresponde a la parte real de la amplitud compleja del desplazamiento y otro que corresponde a su parte imaginaria.

Ahora bien, el objetivo de este trabajo no es realizar un análisis individual, sino estudiar la influencia de la estructura de vía en las vibraciones que aparecen en los edificios colindantes. Para ello será necesaria la realización de una gran cantidad de análisis para un espectro de frecuencias determinado, con tal de capturar lo mejor posible el comportamiento del modelo en ese rango. Este proceso se ha dividido en dos partes, la primera es la realización de los cálculos y la segunda la extracción de los resultados.

Para la realización de los cálculos se intentó utilizar la herramienta de análisis para varias frecuencias integrada en el programa, desgraciadamente esta herramienta solo permite un espaciado uniforme de las frecuencias. Este espaciado no es adecuado ya que nuestros resultados se entienden mejor expresados como espectros en tercios de octava. al pasar a tercios de octava, un espaciado uniforme en frecuencia hace que haya poca información en las bandas de tercio de octava de baja frecuencia e información redundante en las bandas de alta frecuencia. Es por esto que se pasa a utilizar como herramienta para el cálculo los “Load States” (LS en adelante), es decir, casos de carga donde se pueden definir frecuencias arbitrarias. Los LS son archivos que incluyen toda la información del caso de carga que representan, desde variables globales como la frecuencia o el amortiguamiento global hasta las fuerzas y demás condiciones de contorno a aplicar en cada nodo.

Como rango de frecuencias se decide tomar de 0.8 a 90 Hz, para incluir todas las bandas de tercio de octava relevantes, tomando en total 50 frecuencias espaciadas logarítmicamente con tal de alcanzar un balance entre tiempo de cálculo y relevancia de los resultados. Para la generación automática de los casos de carga simplemente se han establecido las condiciones de contorno (tanto absorbente como simetría) en el modelo, se ha colocado una fuerza total de 1 N sobre cada carril y se ha ejecutado la macro siguiente:

```
/SOLU
*dim, fval, array, 50

*VREAD, fval(1), frecuencias, txt
(E15.3)

*DO, i, 1, 50

HARFRQ, fval(i)
LSWRITE, i

*ENDDO

fval=
FINISH
```

Ilustración 19. Código de la macro de generación de LS

Que es una macro sencilla que toma un archivo del directorio de proyecto, “frecuencias.txt”, en el cual se encuentran las frecuencias del análisis y las va estableciendo una a una como frecuencias de cálculo y generando para cada una un archivo LS en el mismo directorio de proyecto.

Para ejecutar el cálculo de los casos de carga generados se puede hacer directamente desde el menú de ANSYS con los comandos “SOLUTION”-> “SOLVE” -> “FROM LS FILES” introduciendo el rango de LS a resolver, con esto se obtendría el campo complejo de desplazamientos para cada frecuencia.

Ahora bien, se recuerda que el objetivo del trabajo era estudiar la influencia de la inserción de medidas correctoras, analizándolas también en función de su rigidez. Para esto se ha generado una macro que repita el procedimiento anterior, pero cada vez que se completen los análisis para todas las frecuencias con una rigidez determinada, se cambia la rigidez y se vuelven a ejecutar los análisis para todas las frecuencias. Además, esta macro extrae los resultados a un archivo de texto para su procesamiento posterior, para ello se hace uso del postprocesador integrado en ANSYS “TimeHist PostPro” a través de comandos.

En nuestro caso se tomarán 100 valores de rigidez logarítmicamente espaciados entre los 30 GPa que tendría un hormigón típico hasta los 0.3 MPa que es un valor extremadamente bajo para cualquier sólido, pero intenta aproximarse a la rigidez equivalente de un material discontinuo, por ejemplo, apoyos puntuales de caucho.

El postprocesador “TimeHist PostPro” está pensado para extraer información de nodos concretos para todo un rango de frecuencias o instantes de tiempo al contrario que su contraparte “General Postproc”, pensado para obtener información de la solución para todo el dominio, pero para una única frecuencia o instante de tiempo.

La macro funciona mediante el siguiente código:

```

1 /POST26
2
3 !LISTA DE NODOS A EXTRAER
4 NODOS=6839,276,1734,4881,4395,3898,3402,2906,2423
5
6 !cálculo del numero total de NODOS A EXTRAER
7 *GET,total_nodos,PARM,NODOS,DIM,X
8
9 n_divisiones=100 !cantidad de materiales puestos (DIRECTAMENTE
10 PROPORCIONAL AL TIEMPO DE CALCULO)
11
12 materiales=
13 *dim,materiales,ARRAY,n_divisiones
14 *VREAD,materiales,prop_materiales,txt !archivo donde estan los valores de
15 variables de material a analizar
16 (E15.3)
17
18 !cálculo del numero total de materiales
19 *GET,total_materiales,PARM,materiales,DIM,X
20
21 *DO, j , 1,total_materiales !inicio del bucle de análisis para cada material
22
23 /PREP7
24 !cambiamos el material del elemento que estamos analizando
25 MP, EX, 4, materiales(j) !el 4 es el elemento al cual le cambiamos el
26 material (rail pad o losa) y el material que cambiamos es el módulo
27 elástico (EX)
28 material_actual=materiales(j)
29
30 !resolvemos el modelo para los casos de carga creados con la macro
31 anterior
32 /SOLU
33 LSSOLVE,1,50,1,
34
35 !pasamos al "TimeHist PostProc" y creamos un vector con todas las
36 frecuencias del análisis
37 /POST26
38 frecs=
39 *dim,frecs,array,50
40 VGET,frecs(1),1
41
42 !creamos el array 'resultados' que almacenará los resultados su tamaño
43 será (num frecuencias)x(nodos a extraer)
44 *dim,resultados,array,50,total_nodos
45
46 *DO, i, 1, total_nodos
47
48 !para cada nodo a extraer sacamos la amplitud (ABS) del
49 desplazamiento en Y para todas las frecuencias y lo almacenamos en
50 una columna de "resultados"
51 NSOL,i+1,NODOS(i),U,Y
52 STORE,MERGE
53 ABS, i+1, i+1
54 VGET,resultados(1,i),i+1
55
56 *ENDDO
57
58 !escribimos en el fichero "resultados_extraidos.txt" los resultados para
59 este material (el comando *VWRITE debe tener tantas repeticiones de
60 "resultados" como nodos a extraer)
61 *CFOPEN,resultados_extraidos,txt,,APPEND
62 *VWRITE,material_actual,frecs(1),resultados(1,1),resultados(1,2),resultados(1
63 ,3),resultados(1,4),resultados(1,5),resultados(1,6),resultados(1,7),
64 resultados(1,8),resultados(1,9)
65 %e %e %e %e %e %e %e %e %e %e
66 *CFCLOSE
67
68 !limpiamos la variable resultados para volverla a usar
69 resultados=
70
71 *ENDDO
72
73 NODOS=
74 frecs=
75 materiales=
76
77 FINISH

```

Ilustración 20. Código de macro de bucle de cálculo y extracción de resultados

Los nodos elegidos en este caso serían los centros de los vanos centrales de cada planta (7 nodos), el nodo central de la solera del túnel y el nodo más inferior de la contrabóveda, 9 en total.

Tras ejecutar esta macro lo que se obtiene es un archivo de texto plano con la amplitud de desplazamiento tanto vertical como horizontal para una fuerza sobre carril de 1 N para todos los nodos seleccionados, las frecuencias elegidas y los materiales asignados. Con un total de $N_{\text{nodos}} \cdot N_{\text{frecs}} \cdot N_{\text{materiales}} \cdot 2(X \text{ e } Y) = 9 \text{ nodos} \cdot 50 \text{ frecuencias} \cdot 100 \text{ materiales} \cdot 2 = 90000$ registros de amplitud de desplazamiento vertical y horizontal, para una fuerza siempre de 1 N sobre el carril. Lo que se obtiene es, por lo tanto, la función de transferencia entre una fuerza aplicada sobre el carril y el desplazamiento vertical y horizontal en los nodos seleccionados.

Truncamiento del dominio: condición de contorno absorbente

El sistema estudiado incluye en su camino de propagación de las vibraciones el terreno el cual, a nivel práctico, es un semiespacio elástico infinito. Definido así, el terreno no se puede representar en un modelo de elementos finitos porque la propia definición del método requiere que su dominio sea finito. Es por esta razón que se debe truncar el dominio, acotando la región de estudio, esto modifica el modelo incluyendo una frontera ficticia, la frontera de truncamiento.

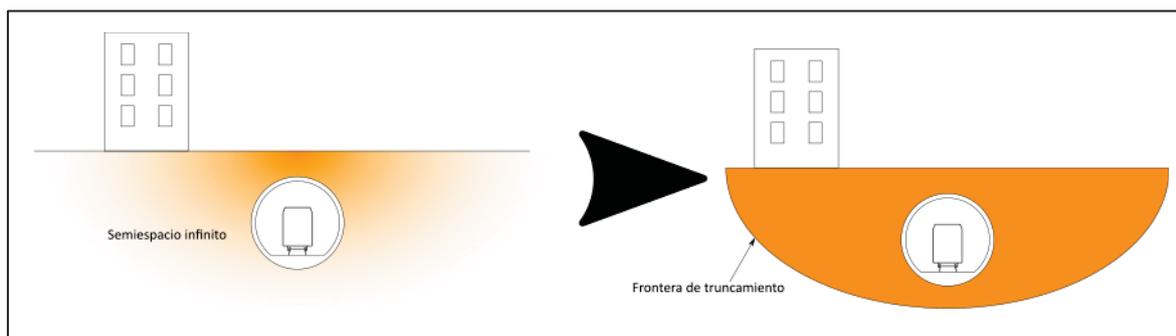


Ilustración 21. Truncamiento del dominio del problema

La aparición de esta nueva frontera modifica el comportamiento del modelo y, por ello obliga a incluir una condición de contorno en esta nueva frontera. Puesto que se quiere simular el comportamiento del terreno como semiespacio infinito, la condición de contorno que se ponga deberá simular esta situación.

La característica principal del semiespacio infinito es que las ondas se propagan indefinidamente en él, no hay reflexión de las ondas al llegar a la frontera del dominio porque no hay frontera del dominio. Esta característica no es tan sencilla de obtener con el modelo truncado, en primer lugar, se intentan utilizar las condiciones de contorno clásicas para el análisis dinámico: el desplazamiento nulo y la tensión nula (o desplazamiento libre). El fenómeno que se observa al realizar los análisis con estas condiciones de contorno es que las ondas vibratorias son reflejadas al alcanzar la frontera de truncamiento, esto adultera los resultados de manera no despreciable haciendo que sean poco útiles.

Partiendo de que la condición a cumplir para que la simulación sea lo más correcta posible con la frontera de truncamiento es que las ondas no sean reflejadas en ésta, se procede a buscar una condición de contorno que no refleje las ondas. Si no se deben reflejar y no se pueden transmitir, pues el dominio no está definido más allá de la frontera, las ondas deberán ser absorbidas en la frontera.

Esta condición de contorno es la que se llama condición de contorno absorbente, ideada originalmente en (Lysmer & Kuhlemeyer, 1969) y aplicada en este trabajo según (Jingbo, Yixin, Xiuli, Zhenyu, & Jun, 2006). Esta condición de contorno absorbente consiste básicamente en añadir, en los nodos de la frontera de truncamiento, un amortiguador viscoso y un resorte en la dirección normal a la frontera en el nodo y otro amortiguador con otro resorte en la dirección tangencial a la frontera en el nodo. Estos amortiguadores y resortes tendrán un extremo vinculado al nodo del que parten y el otro extremo fijo. Además, sus constantes viscosas y elásticas se definirán del siguiente modo:

$$c_n = A * \rho * c_p$$

$$c_t = A * \rho * c_s$$

$$k_n = \frac{4 * G}{R} * A$$

$$k_t = \frac{2 * G}{R} * A$$

Ecuación 7. Constantes de la condición de contorno absorbente

Donde las constantes del lado izquierdo son:

- c_n = Constante del amortiguador viscoso situado en la dirección normal a la frontera.
- c_t = Constante del amortiguador viscoso situado en la dirección tangencial a la frontera.
- k_n = Constante del resorte situado en la dirección normal a la frontera.
- k_t = Constante del resorte situado en la dirección tangencial a la frontera.

Y las que aparecen en el lado derecho son:

- A = Área por metro de espesor asignada al nodo, definida como la mitad de la longitud de los lados de elementos adyacentes al nodo pertenecientes a la frontera de truncamiento. Por ejemplo, en la Ilustración 22, el área asignada al nodo marcado con un cuadrado azul sería el trozo de frontera marcado en rojo. Para elementos de tamaño uniforme, el área asignada es aproximadamente igual al tamaño del lado del elemento.

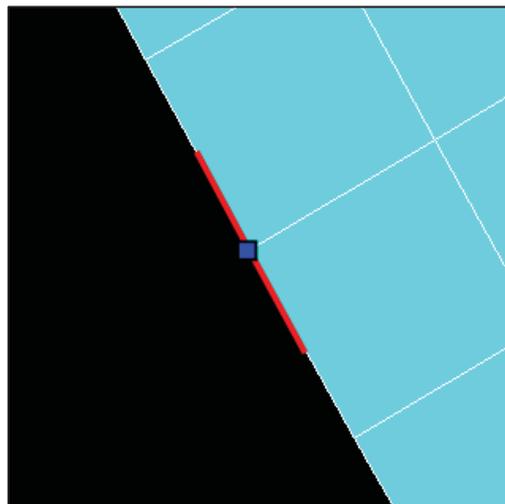


Ilustración 22. Ejemplo de área asignada al nodo

- ρ = Densidad del terreno.
- c_p = Velocidad de las ondas mecánicas longitudinales en el medio.

- c_s = Velocidad de las ondas mecánicas transversales en el medio.
- G = Módulo elástico transversal del terreno.
- R = Distancia desde la fuente de las ondas vibratorias hasta la frontera.

Una vez definida la condición de contorno, falta definir la forma que tendrá la frontera de truncamiento. Hay dos factores principales que determinan la forma a elegir, el primero de ellos es el hecho de que la condición de contorno seleccionada funciona mejor (absorbe un mayor porcentaje de las ondas incidentes) cuando la incidencia de las ondas es perpendicular a la frontera. El segundo factor es la aparición en la ecuación de definición de las constantes de resorte del valor R , que es la distancia de la fuente a la frontera. En el software de análisis utilizado (ANSYS) las constantes elásticas se han de introducir como valores fijos, no pueden depender de factores como por ejemplo R con lo cual se buscará que R sea también un valor fijo.

Tomando estos factores en cuenta (incidencia perpendicular de ondas en frontera y distancia constante entre fuente y frontera) se decide tomar la frontera de truncamiento con forma de circunferencia (semicircunferencia en este caso) con centro en el túnel y radio suficiente como para abarcar los elementos importantes del sistema (túnel y edificio).

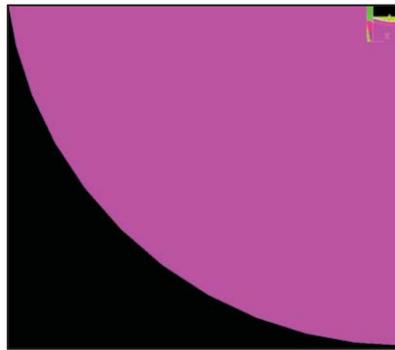


Ilustración 23. Forma del dominio truncado

La aplicación práctica de esta condición de contorno en ANSYS se detalla en el ANEXO I: APLICACIÓN PRÁCTICA DE LA CONDICIÓN DE CONTORNO ABSORBENTE

Medidas correctoras vibraciones

Las vibraciones transmitidas a las personas y los edificios pueden llegar a tener un efecto muy perjudicial sobre estos, es por esto que se han diseñado diversas medidas correctoras para evitar la transmisión de vibraciones perjudiciales desde la vía hasta los receptores (personas y edificios). Estas medidas correctoras se pueden clasificar en función de la parte del sistema de propagación de vibraciones sobre el que actúan: la fuente de excitación, el medio de propagación o el receptor de las perturbaciones.

Primeramente, las medidas correctoras sobre la fuente son las que corrigen la perturbación vibratoria evitando que se produzca o reduciendo su nivel al producirse, este tipo de medidas y las medidas correctoras sobre el medio de propagación son las preferidas principalmente por cuestiones de economía ya que, habitualmente en este tipo de sistemas hay un número reducido de emisores (vías de tren, carreteras) que afectan a un gran número de receptores (viviendas, hospitales, centros educativos) haciendo que sea preferible reducir el sonido en su origen o evitar su propagación, en lugar de proteger a los receptores uno por uno. Se pasa pues a describir algunas de las medidas correctoras sobre la fuente:

- Planificación: una buena planificación de la situación de los ejes ferroviarios, alejándolos de núcleos urbanos, puede evitar la aparición de los problemas vibratorios. Desgraciadamente esta medida entra en conflicto con la función principal del ferrocarril, el transporte de pasajeros.
- Reducción de la velocidad de paso de los trenes: una reducción de la velocidad de paso reduce las cargas dinámicas sobre la vía y por lo tanto las vibraciones producidas, como contrapartida a esta medida se puede argumentar que reduce la capacidad de transporte de la vía aumentando los tiempos de transporte.
- Reducción de la masa no suspendida del material rodante: la masa no suspendida del material rodante es toda aquella masa cuyo peso se transmite de forma rígida a la vía, es decir, que en su camino imaginario de transmisión de esfuerzos no pasa por ningún elemento elástico (suspensión), se está hablando de las masas de ejes, cajas de grasa y demás elementos que estén unidos rígidamente a estos. Esta masa transmite sus cargas dinámicas directamente a la vía, no son amortiguadas por ninguna suspensión con lo cual la reducción de esta masa reducirá a su vez las cargas recibidas por el carril y, en consecuencia, las vibraciones generadas. Esta medida correctora se debe aplicar sobre el material rodante y es objeto de estudio constante en la industria, no obstante, cae fuera del alcance de este trabajo ya que el tren se modelará como una fuerza oscilante sobre el raíl.
- Mantenimiento correcto de ruedas y railes: pequeños defectos de forma en ruedas y railes pueden provocar importantes picos en las cargas dinámicas transmitidas. Cualquier diferencia de forma de la rueda con un círculo perfecto o del raíl con una línea perfecta generará irregularidades en las cargas dinámicas. Por lo tanto, un correcto mantenimiento de la forma y rugosidad de ruedas y railes contribuirá enormemente a que no aparezcan problemas de vibraciones.

- Carril continuo soldado: el carril continuo soldado supone una reducción de las vibraciones con respecto al carril con juntas debido a la eliminación de las discontinuidades en la vía que generan, al paso del tren, grandes picos de carga.

Se ven ahora algunas medidas correctoras que se pueden aplicar sobre el medio de transmisión, considerando como medio de transmisión todos los elementos que hay desde el raíl hasta el edificio:

- Fijación elástica: clásicamente los raíles se fijan a las traviesas o losa de forma rígida, con clavos o pernos embebidos, esto hace que la transmisión de cargas sea directa y que cualquier pico de carga sea directamente transmitido a través de la fijación, las fijaciones elásticas evitan parcialmente este fenómeno reduciendo fuertemente la rigidez de la unión entre raíl y traviesa. Esto se consigue interponiendo entre el raíl y su soporte un elemento elástico, habitualmente un elastómero como el caucho. La rigidez de este elemento debe ser seleccionada con cuidado ya que una rigidez demasiado baja ocasionaría deflexiones excesivas en el raíl con el desgaste que eso conlleva y una rigidez demasiado alta anularía el propósito de la medida no consiguiendo reducir las vibraciones.



Ilustración 24. Ejemplo de fijación elástica (AGICO GROUP, 2019)



Ilustración 25. Traviesa Greenrail™ (Giarrusso, 2019)

- Traviesas recubiertas de elastómero: este método consiste en añadir una lámina de material elastómero en la parte inferior de las traviesas, su principio de funcionamiento es idéntico al de la fijación elástica protegiendo además las traviesas del desgaste, su efectividad puede ser ligeramente mayor al incluir más masa antes del elemento elástico. La inclusión de masa antes del elemento elástico provoca una reducción en el valor de la frecuencia natural del sistema dinámico resultando, habitualmente en una mayor atenuación de las vibraciones. Existen nuevos desarrollos sobre este concepto consistentes en cubrir toda la traviesa de material elastómero con el fin de proteger también el balasto y utilizar neumáticos retirados para el recubrimiento aprovechando sus características y dándoles un nuevo uso.
- Mantas de elastómero bajo balasto: con un principio de funcionamiento igual a los dos métodos anteriores, la colocación de mantas bajo balasto permite una buena reducción de las vibraciones protegiendo además el balasto del desgaste. Permiten una mayor reducción de las vibraciones debido a la mayor cantidad de masa y son de instalación sencilla. No obstante, suponen un incremento notable en la cantidad de caucho necesaria en comparación con la solución en traviesas o fijaciones.



Ilustración 26. Manta bajo balasto (Specifier, 2019)



Ilustración 27. Losa flotante sobre apoyos puntuales (PRC Ltd, 2019)

- Losa flotante: esta medida no solo se basa en la interposición de material elástico en el camino de las vibraciones, sino que también aprovecha de forma activa la masa que hay antes de este material. Su principio de funcionamiento se puede explicar con un sistema dinámico de 1 GDL sencillo.

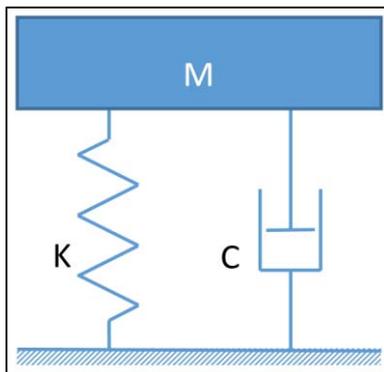


Ilustración 28. Esquema sistema dinámico 1 GDL

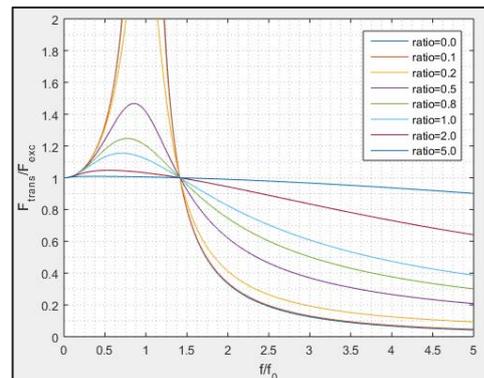


Ilustración 29. Función de transmisibilidad de fuerzas

El sistema de la losa flotante lo se representa como una masa M, la masa de la losa unida mediante un resorte y un amortiguador (K y C respectivamente) a una base fija (el terreno). Como se puede ver en la Ilustración 29 la transmisibilidad de las fuerzas, esto es la proporción entre la fuerza de excitación del sistema y la transmitida al soporte (terreno), se reduce para frecuencias de excitación superiores a $\sqrt{2} * f_0$, siendo f_0 la frecuencia natural del sistema. Esta frecuencia natural convendrá reducirla para que así todas las frecuencias excitadoras queden por encima del valor dicho y por lo tanto sean atenuadas (no transmitidas al terreno). La frecuencia natural del sistema se calcula mediante la operación siguiente:

$$f_0 = \frac{1}{2 * \pi} \sqrt{\frac{K}{M}}$$

Ecuación 8. Cálculo de la frecuencia natural de un sistema dinámico de 1 GDL

Así pues, para reducir la frecuencia natural se deberá reducir la rigidez del sistema y/o aumentar su masa. Esto es justamente lo que se hace con el sistema de losa flotante situando la vía sobre una losa de hormigón (aporte de masa) que después se apoya sobre una serie de

soportes, continuos o puntuales, con una baja rigidez vertical. Este sistema permite conseguir grandes reducciones de las vibraciones transmitidas pero su coste es elevado y su ejecución compleja, además, una losa flotante mal ejecutada podría hacer resonar el sistema siendo contraproducente y aumentando así el nivel de vibraciones transmitidas.

- Zanjas: habitualmente, para atenuar el ruido aéreo producido por ferrocarriles y carreteras, se utilizan pantallas acústicas que reflejan y absorben el sonido antes de que este llegue a los receptores potencialmente afectados. Estas pantallas funcionan porque se basan en el fenómeno físico de reflexión de ondas: las ondas, cuando llegan a una transición entre dos medios (aire – pantalla) son transmitidas o reflejadas en relación a la similitud o diferencia entre las impedancias (proporcional a la densidad y a la velocidad del sonido) de estos medios, si las impedancias son muy distintas la onda será principalmente reflejada y si las impedancias son similares la onda será mayormente transmitida. En el caso de las pantallas acústicas se tiene un medio como el aire, de baja impedancia y la pantalla que suele ser metálica o de hormigón, ambos con una alta impedancia dando como resultado una reflexión casi completa del sonido.

Este razonamiento se puede aplicar igualmente a las vibraciones transmitidas por el terreno excepto que, en lugar de incluir un elemento de mayor impedancia, resulta más sencillo incluir un elemento de menor impedancia que el terreno, el aire, lo que es equivalente a la excavación de una zanja paralela a la vía. Así las ondas de vibraciones al encontrarse con una transición entre medios, del terreno al aire, puesto que el aire tiene una impedancia mucho menor que el terreno, las ondas serán reflejadas.

Las zanjas no son una solución utilizada habitualmente por su alto coste y necesidad de mantenimiento (si se llenan de tierra por cualquier razón, pasan a ser inútiles).

En cuanto al aislamiento de las vibraciones en el receptor, se pueden aplicar los mismos principios que se han explicado para el aislamiento en el medio de transmisión, la reducción de la rigidez en el camino de propagación. En este caso se pueden poner soportes elásticos en la base de los edificios (similares a los que se utilizan en los viaductos) en su etapa de construcción y/o ajustar la masa de los forjados para evitar su resonancia. Estas soluciones deben ser planteadas en fase de construcción ya que aplicarlas con posterioridad supondría un elevado coste económico.

En el presente trabajo se estudiará la efectividad de las fijaciones elásticas, de la losa flotante, de las zanjas y de la capa de material elástico bajo el edificio como métodos de corrección de los problemas vibratorios mediante la simulación de la aplicación de estos sistemas a un caso concreto.

Estas medidas se han seleccionado por ser las más fácilmente analizables mediante el procedimiento y modelo expuestos anteriormente ya que su inclusión y modificación no requiere de grandes cambios y los cambios necesarios, en su caso, son automatizables:

- La fijación elástica y la capa de material elástico bajo el edificio se pueden incluir como unas pequeñas franjas de material distinto en el modelo original.
- La losa flotante se puede incluir de forma similar desmallando además parte de la losa.
- Las zanjas se pueden incluir como pequeñas subdivisiones del terreno, mallándolas de forma independiente.

Ejecución del modelo de elementos finitos

Definición de materiales del modelo

Los modelos materiales definidos para el modelo de elementos finitos tienen las siguientes características:

- Cumplen la ley de Hooke generalizada, se trata de materiales elásticos y lineales. Esta aproximación suele ser válida para pequeños desplazamientos, como es el caso con las vibraciones transmitidas en el presente estudio.
- Son isótropos, se comportan de igual modo en todas las direcciones del espacio. Esta aproximación es correcta si la estructura interna de los materiales participantes en el análisis es amorfa o aleatoria, una suposición razonable para los materiales presentes en el modelo.
- Su densidad es constante, aproximación buena para materiales como el acero, el hormigón o los elastómeros.
- El mecanismo de disipación de energía dinámico se modela con el método del factor de pérdidas, descrito en el apartado “Descripción del método de los elementos finitos (MEF)” y tomado constante por falta de información sobre su variabilidad.

Estas características permiten definir el comportamiento de los materiales con únicamente 4 constantes:

- Módulo de Young (E): constante elástica definida como la proporción entre tensión y deformación en la región elástica de un material. Define la rigidez del material.
- Coeficiente de Poisson (ν): constante elástica definida para un caso de carga longitudinal simple como la proporción entre la deformación transversal y la deformación longitudinal.
- Densidad (ρ): proporción entre masa y volumen del material.
- Factor de pérdidas (η): definido para cargas cíclicas como la proporción entre la energía perdida en un ciclo de carga y la máxima energía acumulada por el material en ese ciclo.

Se detallan en la tabla siguiente los valores de estas constantes para los materiales que aparecen en el estudio:

	E (Pa)	ν (-)	ρ ($\frac{kg}{m^3}$)	η (-)
Acero	210×10^9	0.3	7800	0.001
Hormigón	30×10^9	0.25	2300	0.01
Terreno	50×10^6	0.3	2000	0.1

Tabla 1. Propiedades de los materiales del modelo

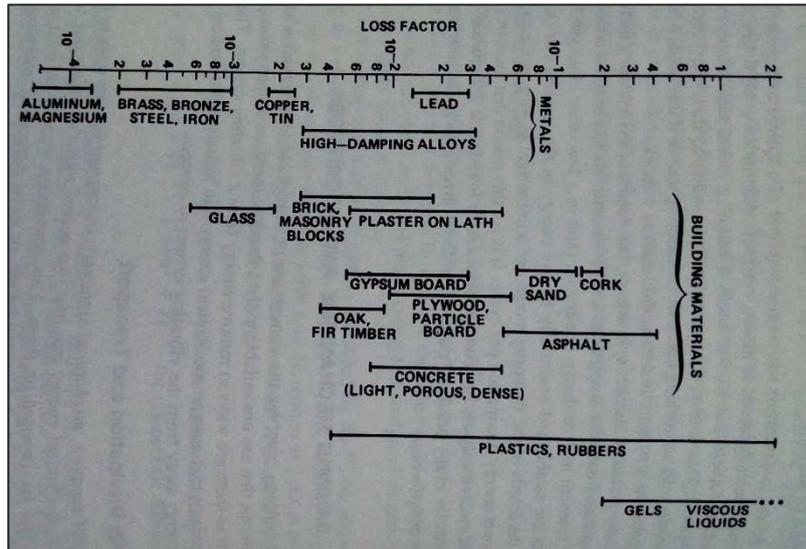


Ilustración 30. Valores del factor de pérdidas para algunos materiales (Vér & Beranek, 2010)

En cuanto al terreno, su densidad depende, en realidad, de su grado de compactación ya que es un material poroso y habitualmente granular. Además, su modelo de comportamiento mecánico es no lineal y lo que se modela es una aproximación más o menos razonable al comportamiento real de este material.

Las propiedades mecánicas del terreno han sido obtenidas de (Geotechdata.info, 2013) y (Jsg.utexas.edu, 2019). En cuanto al hormigón y el acero las propiedades han sido tomadas como valores típicos sin más investigación al respecto.

Para la realización del modelo de elementos finitos se utiliza el software ANSYS, en su versión Student que ofrece una funcionalidad igual a la versión completa, pero con un límite de 32000 nodos en la malla del modelo para análisis estructurales.

Tomando en consideración la información de los apartados “Descripción del método de los elementos finitos (MEF)” y “Descripción del sistema” se decide seguir el siguiente procedimiento para la ejecución de los análisis:

1. Generación de geometrías y asignación de propiedades
2. Mallado
3. Generación de condiciones de contorno (fuerzas y Lysmer)
4. Asignación de condiciones del cálculo (frecuencias, análisis senoidal etc. macro iterativa)
5. Tratamiento de resultados

Partes del modelo

En este apartado se pasa a explicar la generación de la geometría del modelo de elementos finitos, generada por completo mediante el preprocesador de ANSYS con tal de asegurar la compatibilidad. Se recuerda que la generación de la geometría se debe realizar siempre teniendo en cuenta que se va a utilizar posteriormente para un análisis de elementos finitos y que, por lo tanto, los elementos que conforman el modelo deben cumplir una serie de requisitos como la definición de geometrías compartidas entre figuras geométricas para asegurar el correcto mallado.

Se explicarán ahora, uno a uno, los elementos del modelo:

Carril

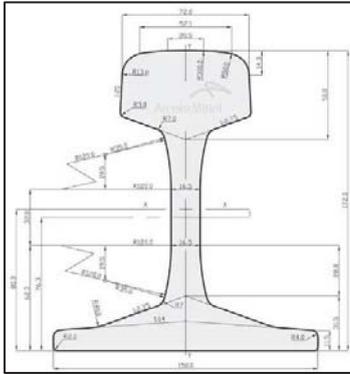


Ilustración 31. Carril 60E1 (ArcelorMittal, 2019)

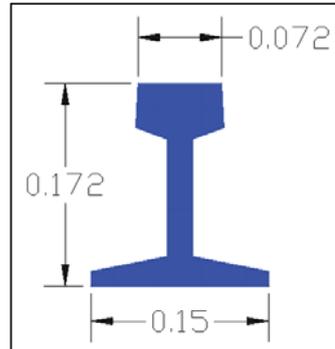


Ilustración 32. Representación gráfica del carril (cotas en metros)

Como carril se ha tomado un carril “60E1 / UIC 60” cuya geometría se ha simplificado para facilitar el mallado automático. La simplificación de la geometría se traduce en una reducción de los elementos utilizados en el mallado del carril que, al fin y al cabo, no es la parte del sistema de la cual se quiere extraer información. El material asignado al carril será el acero, con propiedades elásticas y físicas típicas.

Rail pad



Ilustración 33. Representación gráfica del rail pad (cotas en metros)

El rail pad es el elemento geométrico que se interpone entre el carril y el hormigón del túnel, con el objetivo de agilizar los análisis y hacer el modelo más versátil, se mallará como un elemento independiente del hormigón del túnel con un material asignado propio. Así, para realizar un análisis con y sin rail pad será suficiente con asignar a su material las propiedades de un elastómero o del hormigón respectivamente, sin necesidad de generar un nuevo modelo y una nueva malla. Además, esta asignación de material permitirá probar distintos valores de rigidez y ver su efecto sobre las vibraciones.

Túnel

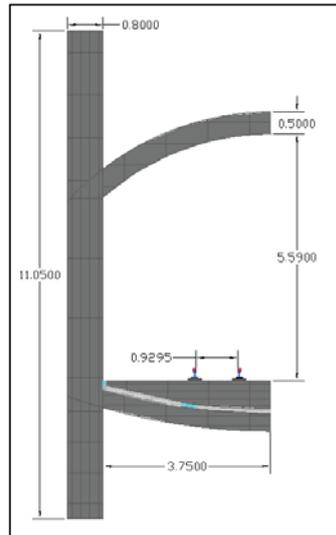


Ilustración 34. Representación gráfica del túnel (cotas en metros)

La geometría de la sección del túnel está basada en las dimensiones y forma del túnel de pantalla de pilotes del metro de Valencia a su paso por la calle Campos Crespo. El material asignado será el hormigón y se han preparado también las dos partes cian que tendrán un material asignado propio con un objetivo similar al de la asignación de material del rail pad, para el caso base este material tendrá propiedades idénticas al hormigón del resto del túnel y, después, estas propiedades se modificarán reduciendo su rigidez y se eliminarán los elementos marcados en gris más claro con el fin de probar los efectos de una configuración de túnel en losa flotante. De nuevo esta configuración del modelo permitirá que estas pruebas con losa flotante se ejecuten de forma ágil sin tener que realizar una gran cantidad de cambios en el modelo.

Las partes dibujadas en cian tienen las dimensiones siguientes:

	Ancho (m)	Alto (m)
Soporte inferior	0.35	0.1
Soporte lateral	0.06	0.1

Tabla 2. Dimensiones de los soportes de losa

Terreno

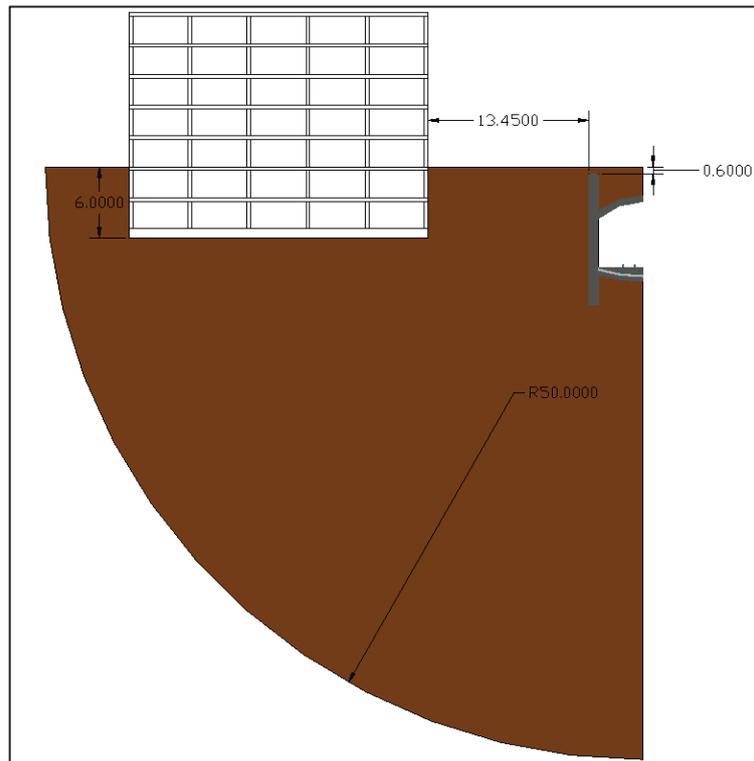


Ilustración 35. Representación gráfica del terreno (cotas en metros)

El terreno se representa como un cuarto de círculo de 50 m de radio con propiedades de arcilla media. Por simplicidad se ha considerado un terreno uniforme en lugar de un caso con terreno a capas como ocurriría en la realidad. La forma circular del terreno se explica en el apartado “Truncamiento del dominio: condición de contorno absorbente”. Esta es la parte del modelo que mayor cantidad de elementos abarca debido a la baja velocidad de propagación de las ondas en su material y a su gran tamaño.

Zanjas

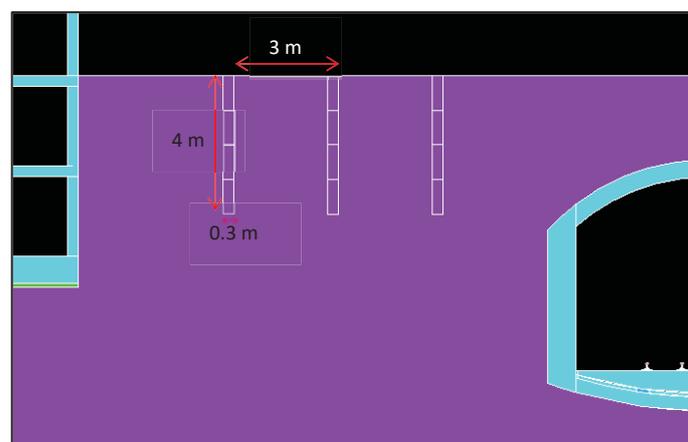


Ilustración 36. Zanjas situadas entre el túnel y el edificio

Se modelan en el terreno además 3 zanjas de profundidad variable a tramos de 1 m y espaciadas 3 m entre sí para así estudiar el efecto de esta medida correctiva sobre la propagación de las vibraciones al edificio. Este estudio se hará mallando independientemente cada tramo (rectángulos con borde blanco en la Ilustración 36) y después realizando varios análisis desmallando tramo a tramo para ver la influencia tanto de la profundidad de la zanja como de su distancia al eje de vía. Desmallar una geometría (eliminar sus elementos de la malla del modelo) es equivalente (en el modelo) a la excavación de una zanja ya que esta geometría deja de participar en el cálculo y por lo tanto deja de aportar rigidez y transmitir vibraciones y esfuerzos.

Edificio

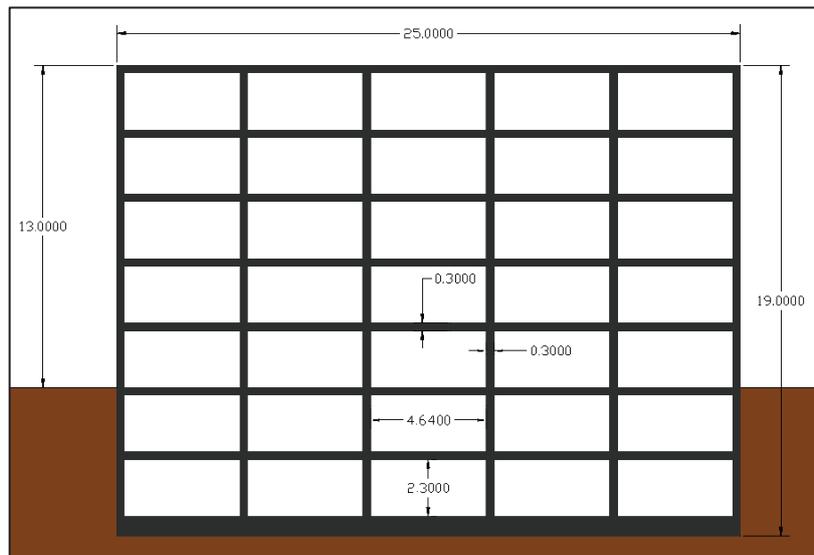


Ilustración 37. Representación gráfica del edificio (cotas en metros)

El edificio se ha realizado con las dimensiones que aparecen en la Ilustración 37 tomando como material un hormigón típico. Los centros de los vanos centrales de cada planta son los puntos donde se calcularán las vibraciones resultantes, es decir, la vibración en estos puntos se utilizará como indicador de las vibraciones del edificio completo.

Además, en la base del edificio se toma una franja horizontal de 0.1 m de espesor la rigidez de cuyo material se modificará en los análisis con tal de probar el funcionamiento de éste método como atenuador de las vibraciones.

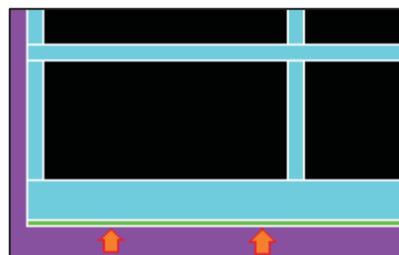


Ilustración 38. Franja de la base del edificio con distinto material

Adicionalmente, para asegurar que su comportamiento es próximo al de un edificio real, se ha realizado un análisis modal por separado a uno de los forjados con tal de calcular sus frecuencias propias con el siguiente resultado para su primera frecuencia propia:

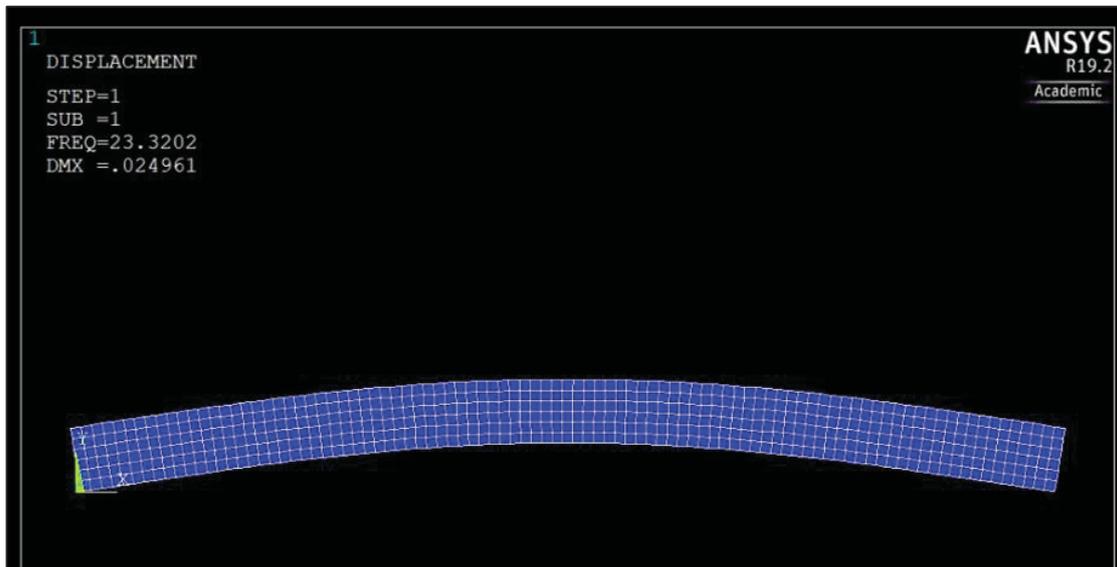


Ilustración 39. Análisis modal forjado independiente

Que se encuentra dentro del rango de valores típico para este tipo de elementos, entre 25 y 60 Hz.

Configuración del mallado

Una vez generada la geometría de la sección, el paso siguiente para realizar un análisis por el método de los elementos finitos es el mallado de la sección. El mallado es un proceso que consiste en la discretización del dominio en partes más pequeñas llamadas “elementos”.

El elemento utilizado en este caso será el elemento PLANE182, elemento pensado para la realización de análisis de elasticidad plana, concretamente en su modalidad de deformación plana.

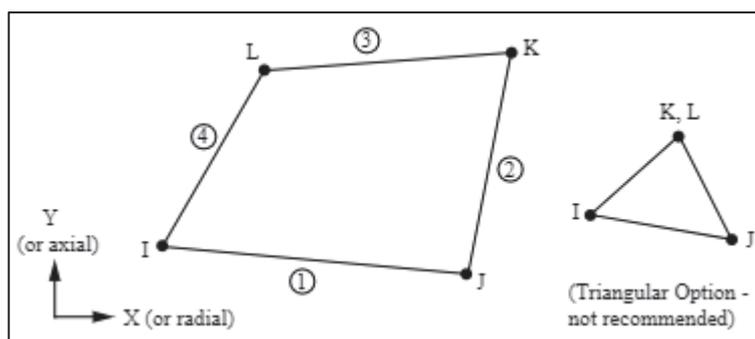


Ilustración 40. Elemento PLANE182 (Sharcnet, 2019)

Un buen mallado, es decir, un mallado que introduzca un bajo nivel de error en la solución, en líneas generales, es aquel que cumple los siguientes criterios (IBERISA, 2019):

- El tamaño de los elementos es más o menos uniforme.
- Se utilizan elementos cuadriláteros con prioridad sobre los triangulares.

- La forma de los elementos es lo más cercana posible a un cuadrado en el caso de los cuadriláteros y a un triángulo equilátero en el caso de los triángulos.

Estas directrices están ya implementadas en el mallado automático del programa ANSYS. Aun así, hay una condición más, específica de los análisis dinámicos, que se debe tener en cuenta y esta es la cantidad de elementos por longitud de onda que se mallan.

Se recuerda que, en un análisis de elementos finitos, tan solo se calcula a partir de la ecuación diferencial discretizada los desplazamientos de los nodos, mientras que los desplazamientos de los puntos no nodales son interpolados. Por esta razón es importante tomar la cantidad de nodos necesaria para la correcta representación de las ondas en relación a su tamaño, para poder capturar su forma correctamente. Para controlar que la relación entre el tamaño de las ondas y el tamaño de los elementos que las representarán sea el correcto se define el parámetro siguiente:

$$\text{Elementos por longitud de onda} = n_{EL,\lambda} = \frac{\lambda}{S_E}$$

Que no es más que la división entre la longitud de onda y el tamaño de los elementos. La longitud de onda más restrictiva será la más pequeña, ya que, si se debe mantener una cantidad de elementos por longitud de onda mínima, una longitud de onda menor requerirá un tamaño de elemento menor.

Para un medio cualquiera, la longitud de onda y la frecuencia se relacionan del siguiente modo:

$$c = \lambda * f$$

Siendo c la velocidad de las ondas en el medio. Con esta definición se puede reescribir el parámetro de elementos por longitud de onda del modo siguiente:

$$n_{EL,\lambda} = \frac{\lambda}{E_s} = \frac{c}{f * S_E}$$

Y, suponiendo que se fija el número de elementos por longitud de onda deseados, se aísla el tamaño del elemento de la ecuación anterior:

$$E_s = \frac{c}{f * n_{EL,\lambda}}$$

Así pues, el tamaño de los elementos tendrá que ser proporcional a la velocidad de las ondas en el material e inversamente proporcional a la frecuencia.

En nuestro análisis, el material más desfavorable desde este punto de vista es el terreno, su rigidez es relativamente baja mientras que su densidad no lo es tanto, esto provoca que su velocidad de propagación de ondas sea baja. Por otra parte, la frecuencia más desfavorable en este punto será simplemente la más alta, en este caso los 80 Hz que es la más alta considerada en los índices de molestia (AENOR, 2008).

Además, la velocidad de propagación depende del tipo de ondas considerado, en este caso, las ondas más lentas serán las más desfavorables y serán las que deberán tomarse en cuenta para el cálculo del tamaño del elemento. Estas ondas son las ondas de Rayleigh, con una velocidad aproximada de (Freund, 1998):

$$c_R = \frac{0.862 + 1.14\nu}{1 + \nu} * \sqrt{\frac{G}{\rho}} \approx 90.8 \left(\frac{m}{s}\right)$$

Así pues, considerando una cantidad estándar de 6 elementos por longitud de onda, la mínima recomendable, por limitaciones de capacidad de cálculo.

$$E_s = \frac{90.8}{80 * 6} = 0.18917 (m)$$

Que será el tamaño de elemento asignado al terreno, el resto de materiales, al ser más rígidos y cumplir sobradamente este requisito se mallarán con el refinamiento mínimo necesario para representar correctamente su geometría.

¿Cómo se mide el impacto vibratorio?

Una vez obtenida la función de transferencia y la fuerza excitadora, se tienen los requisitos necesarios para calcular el desplazamiento (y la aceleración) resultante.

Primero se recapitulan los datos disponibles que son los siguientes:

- Un vector de 1024 valores de amplitud de fuerzas de frecuencias igualmente espaciadas entre 0 y 125 Hz que representan la entrada del sistema. Ver apartado “Cálculo de la fuerza aplicada”.
- Un conjunto de vectores de amplitudes de desplazamiento en los ejes X e Y para 50 frecuencias logarítmicamente espaciadas entre 0.8 y 90 Hz correspondientes al desplazamiento que aparece en los nodos elegidos al imponer una fuerza de 1 N sobre los carriles de la vía. Estos datos definen la FRF del sistema lineal para los nodos seleccionados.

A partir de estos datos, se extraerá una predicción de la aceleración que aparecerá en los nodos elegidos y del correspondiente índice de molestia (L_{aw}). El proceso de ejecución de este cálculo se explicará paso a paso a continuación:

1. El primer paso consistirá en transformar la FRF obtenida que relaciona fuerzas con desplazamientos en una nueva FRF que relacione fuerzas con aceleraciones, que es la variable que se suele tener en cuenta en los criterios de molestia para los humanos. Para ello será suficiente con multiplicar el valor de cada punto obtenido de la FRF de desplazamientos por un factor igual a $(2 * \pi * \text{frecuencia})^2$.

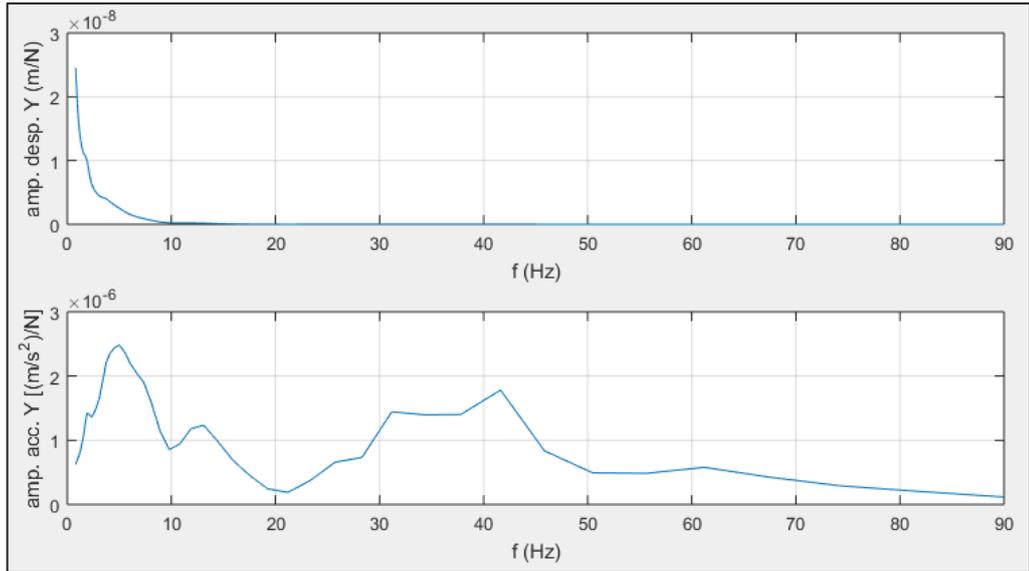


Ilustración 41. Transformación de FRF de desplazamiento a FRF de aceleración

- Se pasa de dos FRF de aceleración, una para el eje X y otra para el eje Y a una sola que se llamará aceleración total, resultado de la operación siguiente:

$$acc_{total} = \sqrt{acc_x^2 + acc_y^2}$$

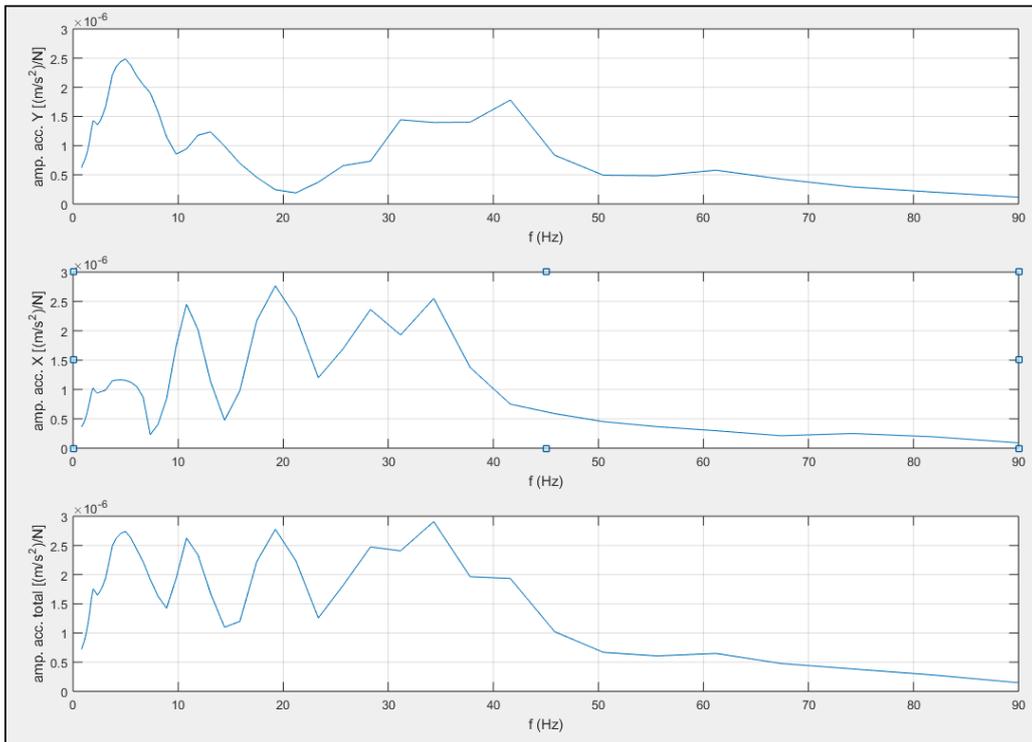


Ilustración 42. Suma de componentes de la FRF de aceleración

- Después, el vector de fuerzas representa un conjunto discreto de señales senoidales a distintas frecuencias, estas frecuencias no son las mismas que a las que se ha calculado la FRF en ANSYS así que el primer paso será interpolar la FRF de aceleración total para las frecuencias para las

que están definidas las componentes de la fuerza obteniendo así otro vector con las frecuencias iguales a las de la fuerza (solo se interpola para las frecuencias dentro del rango de 0.8 a 90 Hz que son para las que se ha calculado en el ANSYS, el resto son ignoradas).

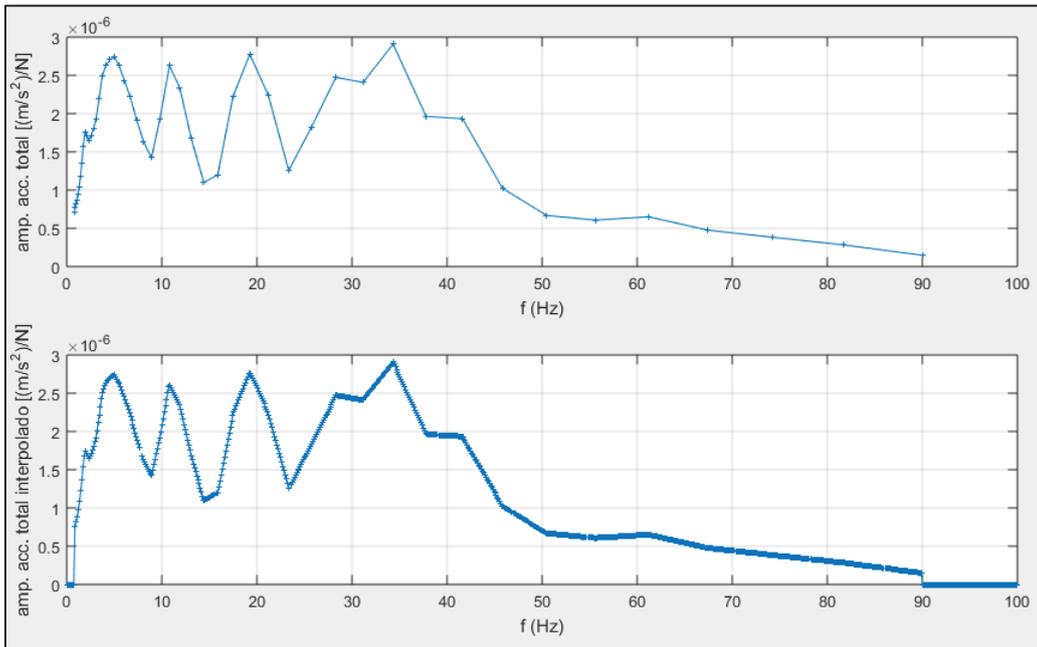


Ilustración 43. Interpolación de FRF de aceleración

- Una vez obtenida la FRF de aceleración para las frecuencias de las componentes de la fuerza, se procede a multiplicar elemento a elemento la amplitud de la FRF con la amplitud de su componente de fuerza para cada frecuencia, obteniendo así la aceleración (sus componentes senoidales) resultante.

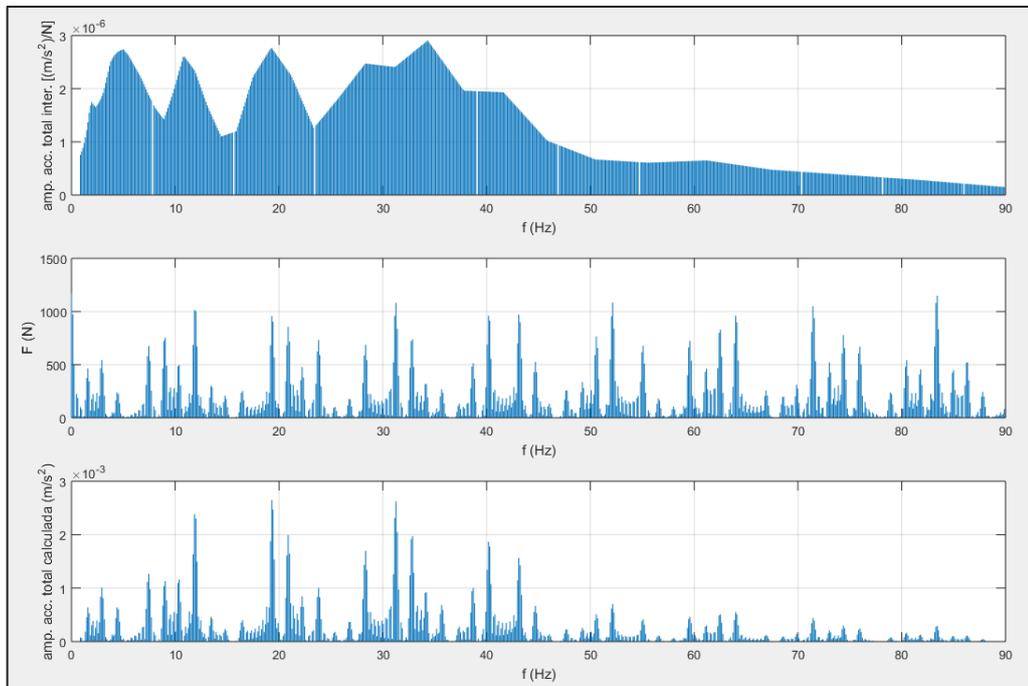


Ilustración 44. Cálculo de la amplitud de la aceleración total

- Una vez obtenido el espectro de aceleración, que es un espectro de banda estrecha y uniforme (de 0.1121 Hz de ancho). Para calcular el índice de molestia de vibraciones se ha de pasar a un espectro en tercios de octava para esto se sumarán los cuadrados de las senoidales cuya frecuencia esté dentro de cada banda de tercios y se hará la raíz del resultado para obtener así el valor asignado a esa banda.

Las bandas de tercios de octava son intervalos de frecuencia que se definen mediante una frecuencia central y dos extremos, dada una frecuencia inicial, que se toma de acuerdo con la norma UNE-ISO 2631-2 (AENOR, 2008) como 1 Hz, el resto de frecuencias se calculan del siguiente modo:

$$f_{cent_n} = f_{cent_{n-1}} * 2^{\frac{1}{3}}$$

$$f_{sup_n} = f_{cent_n} * 2^{\frac{1}{6}}$$

$$f_{inf_n} = f_{cent_n} * 2^{-\frac{1}{6}}$$

$$ancho\ banda_n = f_{sup_n} - f_{inf_n} = f_{cent_n} * \left(2^{\frac{1}{6}} - 2^{-\frac{1}{6}} \right) \approx 0.23156 * f_{cent_n}$$

Como se puede observar, las bandas de tercio de octava tienen un ancho proporcional a su frecuencia central, por lo tanto, no uniforme. Los límites de estas bandas se representan mediante líneas discontinuas rojas en la Ilustración 45.

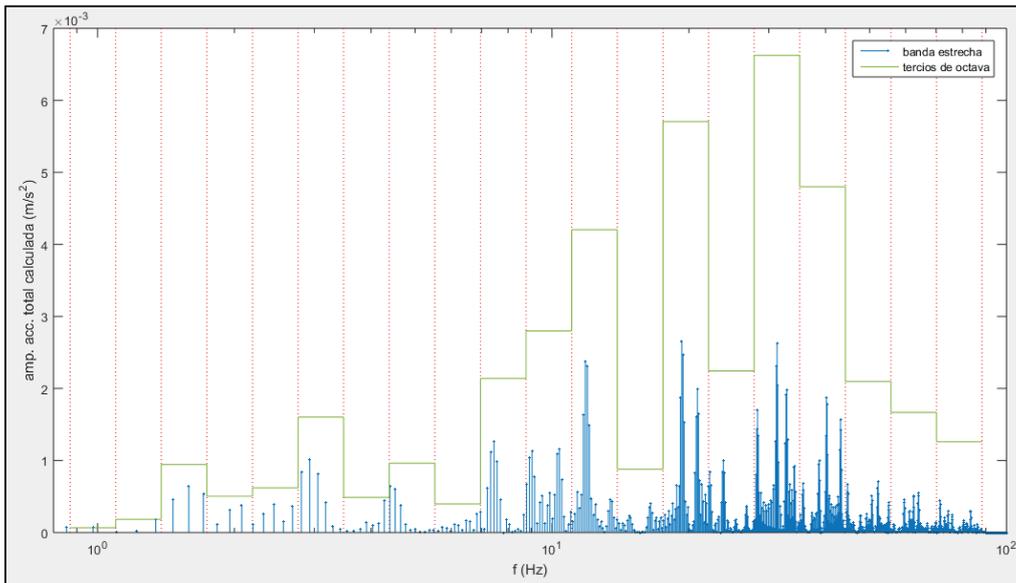


Ilustración 45. Paso de espectro de banda estrecha a banda de tercios de octava

- Obtenida ya la aceleración calculada como espectro de tercios de octava, se pasa ahora a aplicar la ponderación "Wm" que es la ponderación indicada por la norma mencionada anteriormente para el cálculo del nivel de evaluación "Law", esta ponderación se aplica multiplicando las aceleraciones del espectro de tercios de octava por un valor determinado para cada frecuencia:

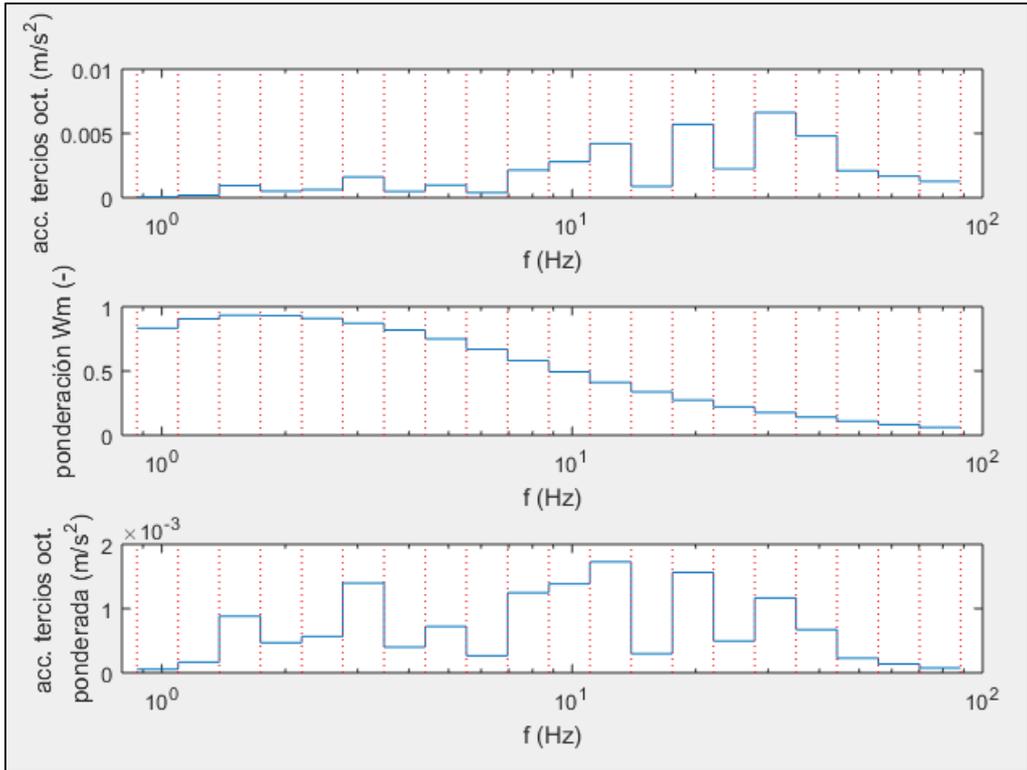


Ilustración 46. Aplicación de la ponderación Wm

La ponderación Wm toma valores que oscilan entre el 0 y el 1 y penaliza más fuertemente a las frecuencias más altas, porque son menos molestas para el ser humano.

- Por último, con la aceleración en tercios de octava ponderada, lo que se hace es una suma cuadrática de los valores y se obtiene su nivel (en dB) para obtener el índice de molestia L_{aw} . La operación a ejecutar es la siguiente:

a_{tp} = aceleración en tercios de octava ponderada
(vector de 20 elementos, una amplitud para cada banda de tercio de octava entre 1 y 80 Hz)

$$a_w = \sqrt{\sum_{i=1}^{20} (a_{tp}[i])^2}$$

$$L_{aw} = 20 * \log_{10} \left(\frac{a_w}{a_{ref}} \right) ; \quad a_{ref} = 10^{-6} \frac{m}{s^2}$$

Ecuación 9. Cálculo del índice Law

Valor que se usará para comparar los distintos resultados de los análisis entre sí y con los límites que establece la ley para infraestructuras, que son, como aparece en el Real Decreto 1367/2007, de 19 de octubre, los siguientes:

Uso del edificio	Índice de vibración L_{aw}
Vivienda o uso residencial	75
Hospitalario	72
Educativo o cultural	72

Tabla 3. Límites del índice Law según Real Decreto 1367/2007

Los resultados del cálculo expuesto eliminan la dimensión de la frecuencia y la de la dirección (X e Y, que han sido sumadas) de los resultados quedando estos, una vez calculado el Law, para cada análisis, como un conjunto de 100 materiales x 9 nodos seleccionados = 900 valores de Law para cada análisis, excepto para el caso de las zanjas para el cual se tienen 12 tipos de zanja x 9 nodos = 108 valores de Law. Se pasa ahora a comparar los resultados de los distintos análisis.

Análisis de resultados

Los resultados obtenidos de los diversos análisis son valores de Law para los nodos elegidos en los casos de carga estudiados. La posición de los nodos elegidos se muestra en la siguiente Ilustración 47.

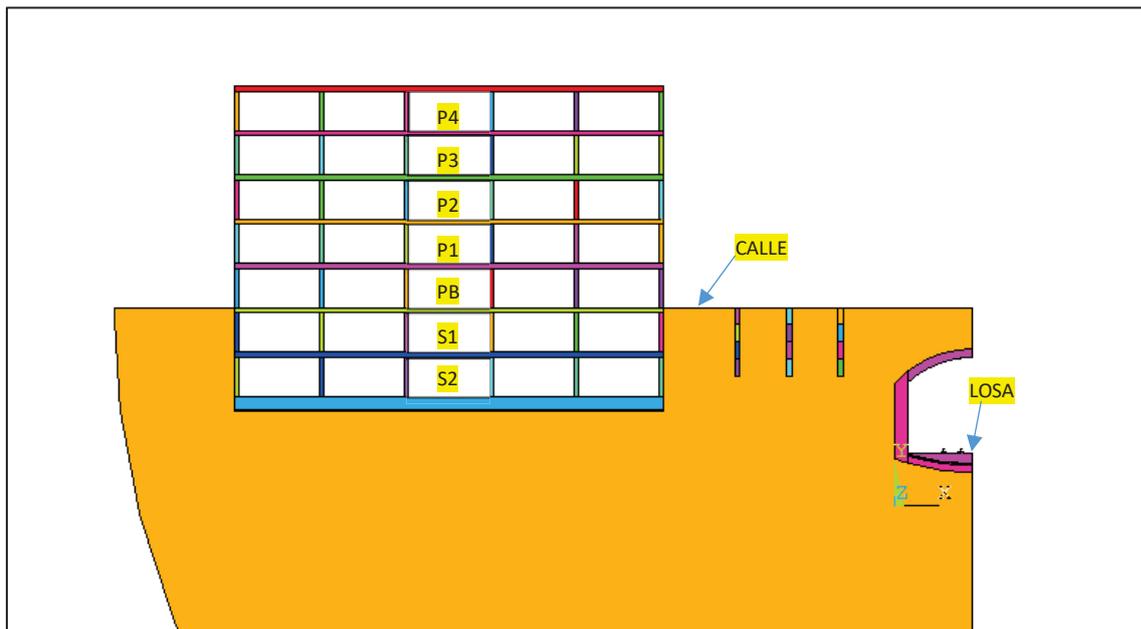


Ilustración 47. Posición de nodos para extracción de resultados

Y los casos de carga definidos son:

- El caso “BASE”, en el cual no se aplica ninguna medida correctora, se trata del modelo descrito en los apartados “Definición de materiales del modelo”, “Partes del modelo” y “Configuración del mallado”.
- El caso “RAIL_PAD”, en el cual se va variando la rigidez del material que conforma el “rail pad”, tomando valores de módulo de Young entre 30 GPa (hormigón) y 0.3 MPa.
- El caso “LOSA_FLOTANTE”, en el cual se desvincula la losa de la estructura del túnel eliminando una franja de elementos de la losa dejando únicamente un soporte inferior y uno lateral (ver “Túnel”) cuya rigidez se va variando, tomando valores de módulo de Young entre 30 GPa (hormigón) y 0.3 MPa.
- El caso “BASE_EDIF”, en el cual se varía la rigidez de una franja de material en la base del edificio emulando el efecto de la colocación de una lámina aislante. El rango de variación de esta rigidez es el mismo que en los casos anteriores.
- El caso “ZANJAS”, en el cual se simula la excavación de zanjas en el terreno entre el túnel y el edificio, ver el apartado “Zanjas”.

Se examinan a continuación los resultados de estos análisis.

Caso “BASE”

Para el caso BASE los resultados del índice Law son los siguientes:

NODO	Law
LOSA	101.5
CALLE	84.5
S2	69.6
S1	70.9
PB	71.8
P1	70.4
P2	71.6
P3	71.7
P4	71.7

Tabla 4. Resultados Law caso BASE

El valor del índice Law es máximo en la vía, se reduce en la calle y se reduce aún más en el edificio, un resultado que era previsible. Se muestra aun así con tal de comparar con los resultados de los otros casos.

Como conclusiones de este resultado, destaca el hecho de que, en el edificio, el nodo que menor vibración registra es el nodo S2, el que está situado en la cimentación. En principio este nodo es el más cercano a la fuente de vibración y el que la recibe de forma más directa, este fenómeno se puede deber a que la cimentación comparte nodos con el terreno con lo cual el movimiento de la losa implica el movimiento del terreno, con la masa y amortiguamiento que este aporta. Los otros nodos del edificio están situados en el centro de vanos que pueden vibrar libremente, teniendo por tanto resonancias e incremento de las vibraciones en el rango de los 25-60 Hz como se indica en el apartado “Edificio”.

Se pasa ahora a ver el contenido en frecuencia de los resultados, se muestra a continuación una gráfica de los resultados de aceleración en tercios de octava antes de aplicar la ponderación W_m :

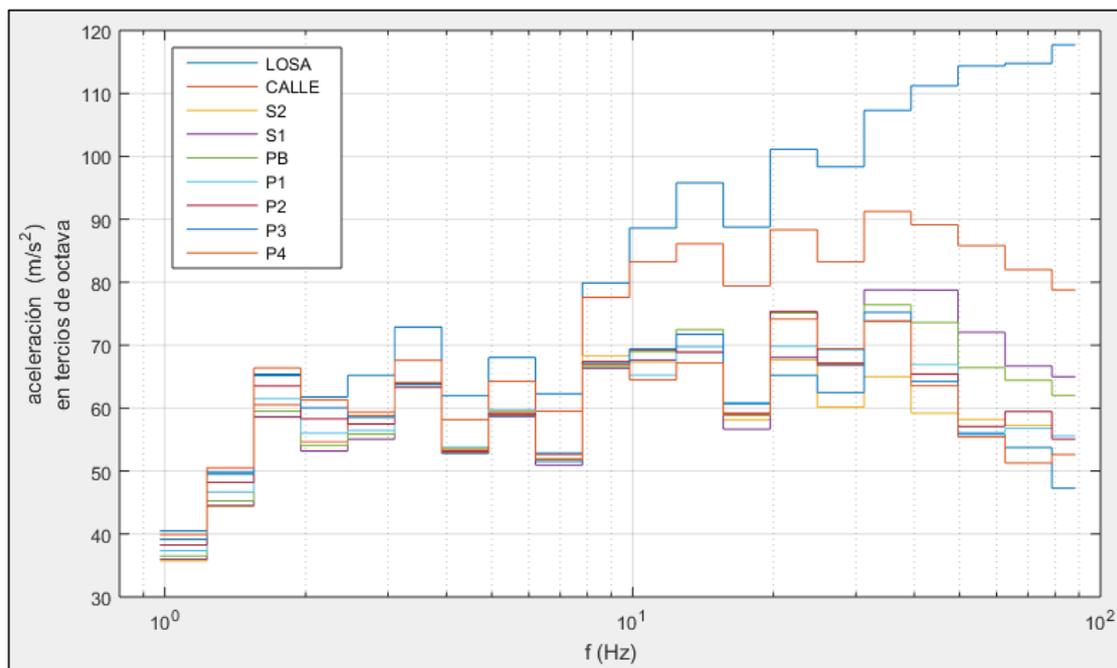


Ilustración 48. Aceleración caso BASE en tercios de octava sin ponderar

En la gráfica se puede observar, además de lo comentado anteriormente, como los valores de aceleración en el edificio son muy similares para todas las plantas para frecuencias inferiores a los aproximadamente 20 Hz, esto indica que el edificio, hasta esa frecuencia, se comporta aproximadamente como un sólido rígido. A partir de los 20 Hz entran en juego la dinámica interna del edificio y sus modos propios lo cual se puede apreciar en la mayor variación en los niveles de vibración de las distintas plantas.

Se observa también en la gráfica que, en efecto, el nodo situado en S2 (en amarillo) muestra un menor valor de vibración que el resto, especialmente en el rango de frecuencias por encima de los 20 Hz, dónde no muestra una pronunciada subida del valor de aceleración, al contrario que el resto de los nodos del edificio.

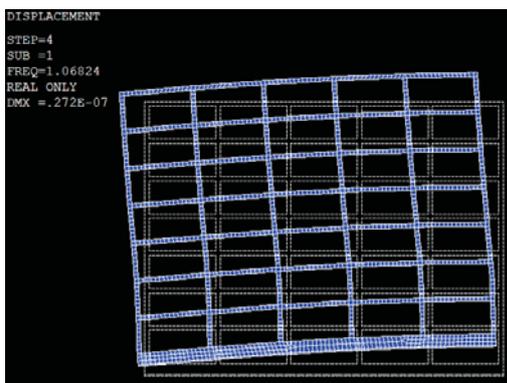


Ilustración 49. Desplazamientos del edificio para una excitación de 1.06824 Hz (multiplicados por 10^8)

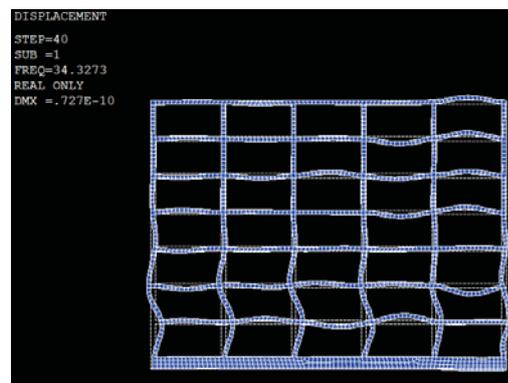


Ilustración 50. Desplazamientos del edificio para una excitación de 34.3273 Hz (multiplicados por 10^{10})

Volviendo a los resultados del ANSYS, se verifica el fenómeno explicado anteriormente según el cual el edificio se comporta dinámicamente de forma muy distinta dependiendo de la frecuencia de la excitación, a frecuencias bajas se comporta como un sólido rígido (Ilustración 49), y a frecuencias altas aparecen resonancias y modos propios internos (Ilustración 50).

Por último, una vez que la excitación supera los 40 Hz aproximadamente, se observa en la Ilustración 48 como el valor de la aceleración va reduciéndose conforme aumenta la frecuencia de la excitación, esto puede deberse a que, por encima de la frecuencia de resonancia, la propia inercia del edificio hace que su respuesta se vea atenuada. Esta reducción es más pronunciada en las plantas a partir de la P1 (incluida) debido a que las plantas S2, S1 y PB reciben directamente las ondas por el lateral del edificio mientras que las plantas superiores las reciben por transmisión a través de la estructura.

Caso “RAIL_PAD”

Para el caso RAIL_PAD los resultados del índice Law son los siguientes:

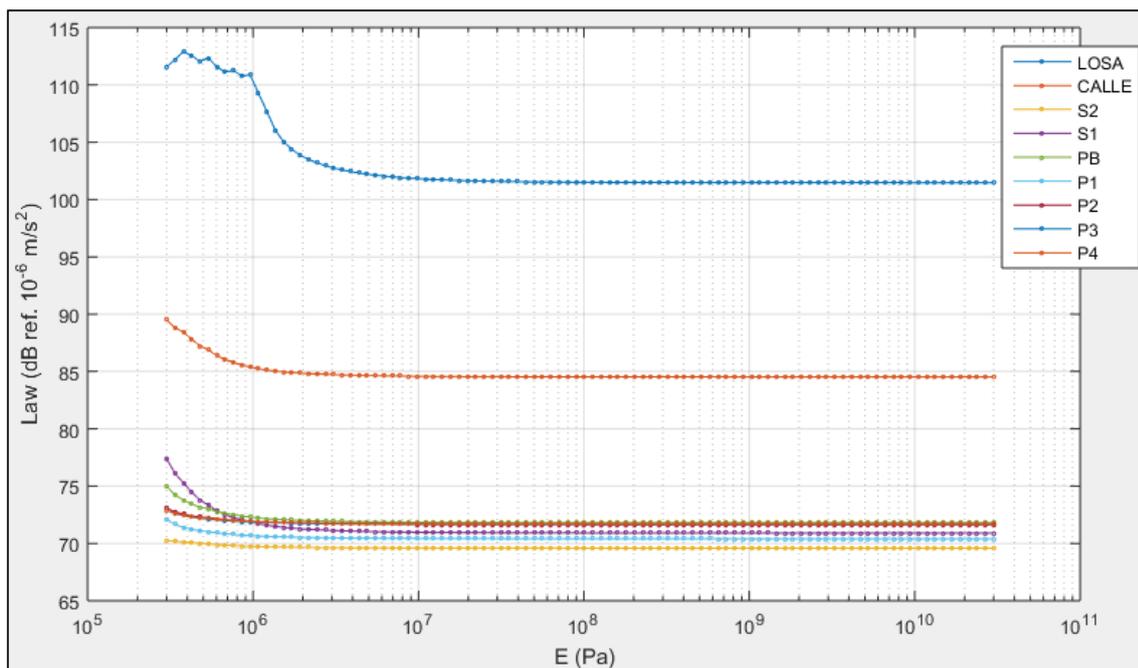


Ilustración 51. Resultados del índice Law, caso RAIL_PAD

En este caso, los resultados se muestran en forma de gráfica ya que se ha calculado un valor de Law para cada nodo y para cada valor del módulo de elasticidad ensayado. El punto de partida, idéntico al caso BASE es el valor de $E = 30 \text{ GPa}$ (valor correspondiente al hormigón)

Como se puede observar, los efectos de la reducción de la rigidez del rail pad sobre las vibraciones en el edificio son: o bien nulos como en el nodo de S2 y los nodos de las plantas altas P4, P3 y P2 (aunque estas plantas muestran un ligerísimo aumento del índice para valores extremadamente bajos de rigidez) o bien negativos como en el caso de las plantas P1, PB y, especialmente, la planta S1 que registran aumentos de hasta aproximadamente 6 dB en el índice.

Las razones que provocan este incremento se encuentran al analizar los espectros de la función de transferencia para este modelo (antes de incorporar el espectro de fuerzas). Para mayor claridad, se mostrará en la gráfica siguiente el incremento que aparece entre el nivel de vibraciones para el caso BASE y el nivel para el caso RAIL_PAD con varios valores de rigidez del rail pad. Este incremento es un parámetro de uso habitual por parte de las empresas fabricantes para indicar el rango de frecuencias útiles de sus productos y se refiere con el nombre de pérdidas por inserción (“insertion loss” en inglés).

Cabe mencionar que, al modificar el módulo de Young del rail pad, se observa que los valores de la FRF de aceleración de todos los nodos, se incrementan (o reducen) en la misma proporción, es decir, si la FRF de aceleración en el nodo de losa aumenta en X dB respecto al valor del caso BASE, la FRF del nodo de calle también aumenta X dB y lo mismo pasa con el resto de los nodos. Esto se puede deber a que el rail pad se encuentra al inicio de la cadena dinámica de transmisión de esfuerzos, afectando por igual a todos los elementos que se encuentran posteriormente. Dicho de otro modo, la inclusión del rail pad no modifica la forma de propagación de las ondas en el medio sino tan solo su magnitud.

Por lo tanto, en la gráfica siguiente, el incremento que se muestra es aplicable a todos los nodos sondeados.

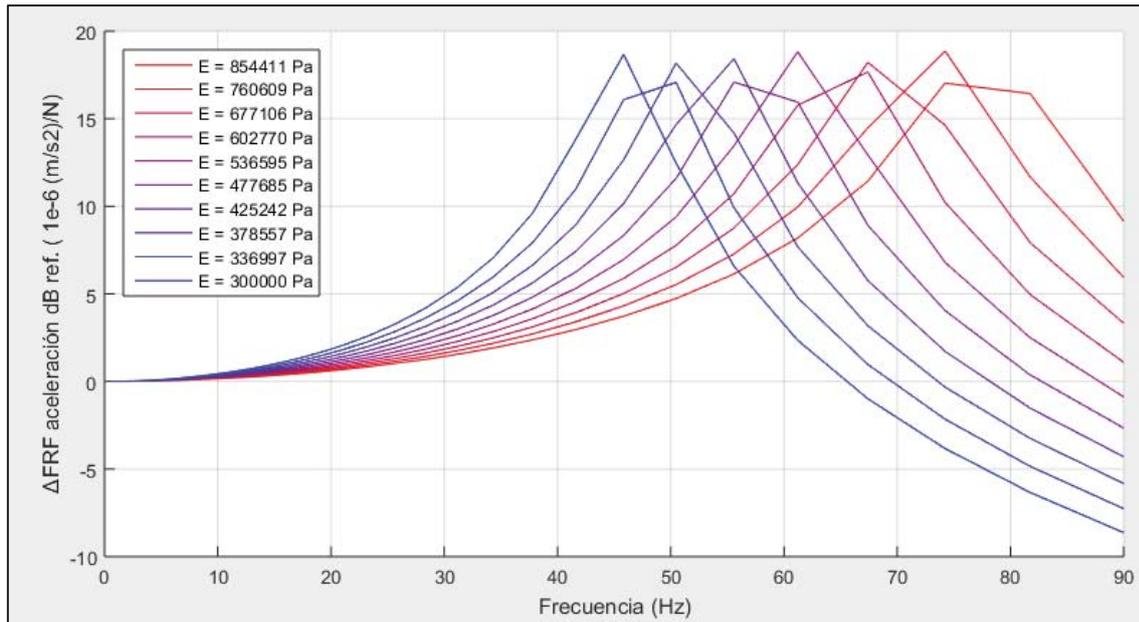


Ilustración 52. Variación de la FRF de aceleración con la rigidez del rail pad

Se muestran solo gráficas de valores de la zona baja del rango de módulos de Young ensayados, puesto que, como se menciona anteriormente, no es hasta que no baja mucho el valor de este parámetro que se empieza a apreciar su efecto en el rango de frecuencias ensayadas.

Analizando la gráfica se observa que aparece una región de frecuencias en las cuales aumenta la receptancia a las vibraciones debido a la aparición de una resonancia de un modo similar al del modelo teórico mostrado en la Ilustración 29, reduciéndose después para frecuencias superiores a un determinado umbral (cruce de la curva con el eje de abscisas) que se llamará frecuencia de atenuación. Esta región de resonancia se desplaza hacia frecuencias más bajas con la reducción del módulo de elasticidad del rail pad, se intenta a continuación cuantificar la relación entre el módulo de elasticidad, la frecuencia de resonancia y la frecuencia de atenuación.

E (Pa)	Frec. Resonancia (Hz)	Frec. Atenuación (Hz)
959780	85.9	-
854411	81.0	-
760609	77.1	-
677106	71.6	-
602770	68.8	-
536595	64.1	87.8
477685	60.2	82.7
425242	57.5	78.2
378557	53.4	73.6
336997	51.1	69.5
300000	47.8	65.5

Tabla 5. Valores de E rail pad y frecuencia de resonancia

Que, mostrados en forma de gráfica resultan en la ilustración siguiente:

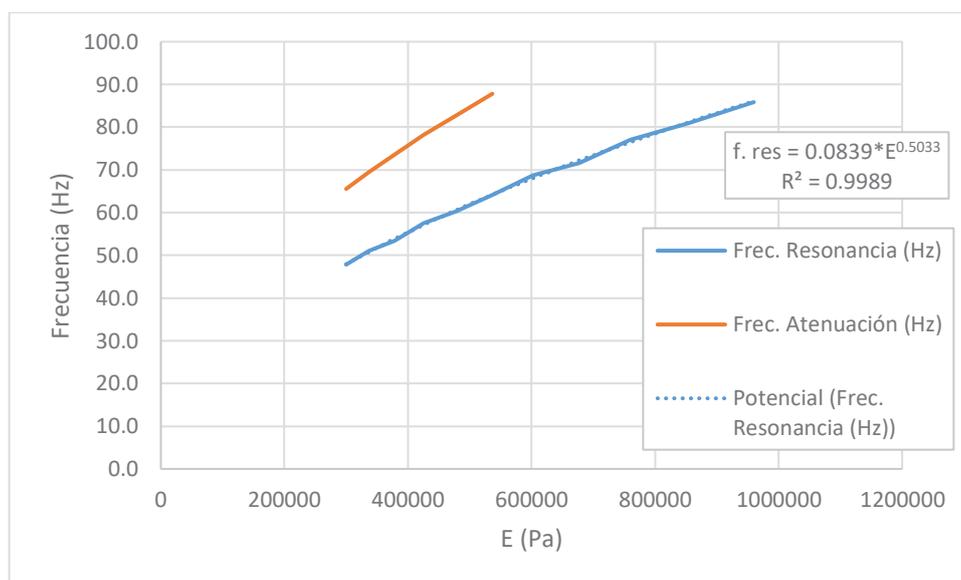


Ilustración 53. Gráfica relación E rail pad y frecuencia de resonancia

En la gráfica se observa una relación ajustada entre la frecuencia de resonancia y el módulo de elasticidad mediante la ecuación:

$$f_{res} = 0.0839 * E^{0.5033}$$

Ecuación 10. Ajuste por mínimos cuadrados de la relación entre fres y E

La ecuación es similar a la ecuación para la frecuencia de resonancia de un sistema masa muelle de 1 GDL descrita por:

$$f_{res \ 1 \ GDL} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Ecuación 11. Ecuación para la fres de un sistema de 1GDL

Lo cual indica que la rigidez del rail pad, cuando baja lo suficiente, domina el sistema dinámico haciendo que se comporte de forma similar a un sistema de 1 GDL.

Despejando el módulo elástico queda:

$$E = 137.519 * f_{res}^{1.9869}$$

Además, la frecuencia de atenuación exhibe una relación de proporcionalidad constante con la frecuencia de resonancia tal que:

$$f_{at} = 1.368 * f_{res}$$

Ecuación 12. Relación observada entre f_{res} y f_{at} para el caso RAIL_PAD

Así pues, la rigidez del rail pad adecuada para obtener atenuación a partir de una frecuencia (f_{at}) determinada se podrá obtener mediante la aproximación siguiente, fruto de la combinación de las dos anteriores:

$$E(Pa) = 73.79 * f_{at}(Hz)^{1.9869}$$

Ecuación 13. Aproximación de E necesario para una fat determinada

Relación que se muestra en la gráfica siguiente:

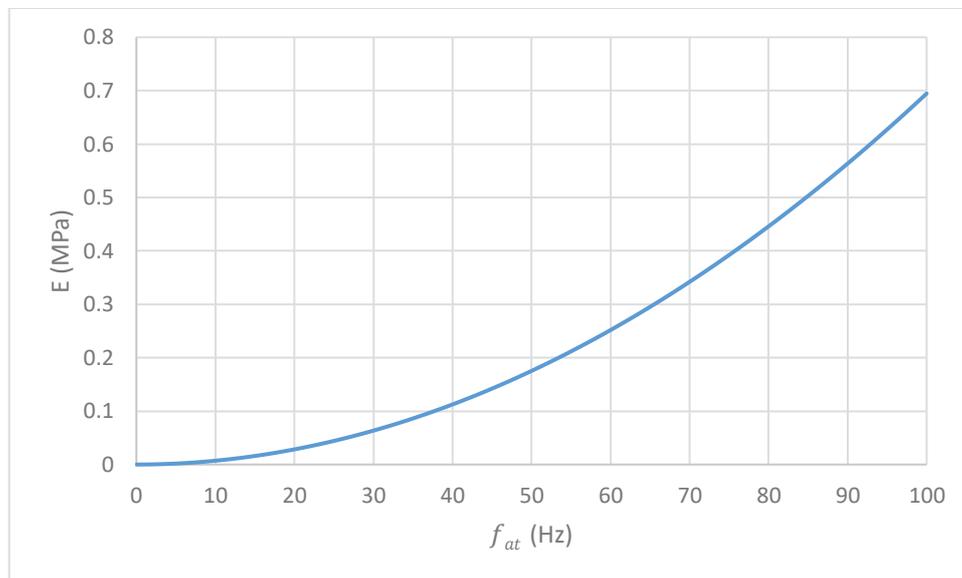


Ilustración 54. Gráfica de la aproximación de la rigidez de diseño para cada frecuencia de atenuación

Estas rigideces toman valores extremadamente bajos para cualquier material, incluso para polímeros elásticos como por ejemplo un caucho cuyo valor oscilaría alrededor de los 10 MPa. Ya que estos valores tan bajos de módulo elástico no se pueden alcanzar, lo que se busca es reducir la rigidez por otras vías, se explica ahora cómo se calcula teóricamente la rigidez vertical del rail pad (k) partiendo de un comportamiento elástico lineal y su relación tensión deformación:

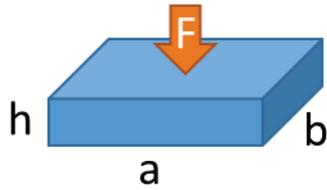


Ilustración 55. Esquema del caso de carga vertical del rail pad

$$\begin{aligned} \sigma &= E * \varepsilon \\ \frac{F}{a * b} &= E * \frac{\Delta h}{h} \\ \frac{F}{\Delta h} &= k = E * \frac{a}{h} * b \\ \frac{k}{L} &= E * \frac{a}{h} * \frac{b}{L} \end{aligned}$$

Ecuación 14. Cálculo de la rigidez vertical del rail pad

Se observa en la Ecuación 14 que la rigidez por unidad de longitud de vía (k/L) es directamente proporcional al módulo elástico del material, al ancho del rail pad y a la proporción de vía con rail pad debajo, por ejemplo un sistema de vía en el cual de cada metro de vía tan solo hay medio metro soportado por rail pad tendría un valor del parámetro b/L igual a 0.5. Es decir, reducir a la mitad el ancho del rail pad o la proporción de vía soportada tiene un efecto dinámico equivalente (afecta igual a la frecuencia de atenuación) a reducir a la mitad el módulo elástico del material. Por desgracia, habitualmente estos parámetros vienen determinados por el sistema de vía, la colocación de las traviesas y el ancho del patín del carril así que no queda mucho margen de maniobra.

Por otra parte, se observa que la rigidez es inversamente proporcional al espesor del rail pad, si se dobla el espesor, la rigidez se reduce a la mitad, siendo de nuevo su efecto equivalente a la reducción en un 50 % del módulo elástico. Este parámetro del espesor es, junto con el módulo elástico del material, el que más libertad permite en el diseño de este elemento permitiendo reducir la rigidez de vía lo necesario para obtener la frecuencia de atenuación deseada.

Por último, se mencionará que, aunque aquí se ha hecho un cálculo simplificado del dimensionamiento del rail pad, hay multitud de factores extra que influyen en su diseño entre los cuales figuran la rigidez deseada de la vía en su conjunto, que si es demasiado baja puede ocasionar problemas dinámicos en el material rodante; factores ambientales como la resistencia a los agentes químicos o al agua y factores económicos entre otros.

Con todo lo dicho, no se ha encontrado un módulo elástico realista que permita reducir las vibraciones transmitidas y no se tiene suficiente información como para saber si existe algún espesor viable de este elemento que pueda conseguir este objetivo de atenuación de las vibraciones. Por lo tanto, no se puede concluir que el rail pad sea una medida correctora efectiva para los problemas vibratorios ocasionados por las infraestructuras ferroviarias.

Se pasa ahora al estudio del caso de carga siguiente, con un sistema de losa flotante.

Caso “LOSA_FLOT”

Para el caso LOSA_FLOT los resultados del índice Law son los siguientes:

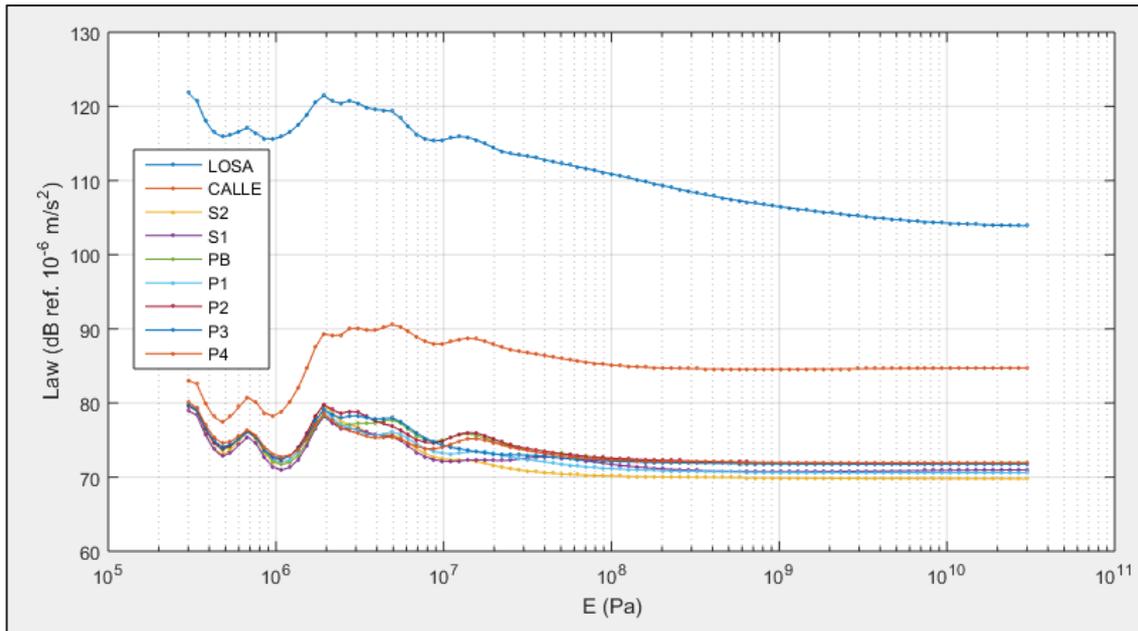


Ilustración 56. Resultados del índice Law, caso LOSA_FLOT

Lo primero que se observa es que los valores de Law para el punto de partida (módulo de Young igual a 30 GPa) no son exactamente iguales al caso base:

NODO	Law BASE	Law LOSA_FLOT (E = 30 GPa)
LOSA	101.5	103.9
CALLE	84.5	84.7
S2	69.6	69.8
S1	70.9	71.0
PB	71.8	72.0
P1	70.4	70.6
P2	71.6	71.8
P3	71.7	71.7
P4	71.7	71.9

Tabla 6. Comparación valores Law caso BASE y caso LOSA_FLOT

Esto se debe a que, en este caso de carga, al contrario que en el caso RAIL_PAD, sí que cambia la geometría del modelo y no solo las propiedades de los materiales, desapareciendo en este caso toda una franja de material de la losa de vía.

A continuación, en la Ilustración 56 se observa que no todos los nodos del edificio modifican su valor de Law en la misma proporción al modificarse la rigidez, de este fenómeno se puede deducir que el cambio en la rigidez del material de los soportes de la losa flotante, no solo modifica la magnitud de las vibraciones, sino que además modifica su forma de propagación (la forma de las ondas).

Además, analizando las curvas del valor Law para los nodos del edificio, se pueden identificar varias zonas diferenciadas que se describirán a continuación:

Empezando por la derecha de la gráfica (valores altos de rigidez) se puede apreciar que, hasta una rigidez de aproximadamente 2 MPa, el valor del índice Law aumenta para todos los nodos, primero de forma lenta para después pasar a un aumento más rápido conforme más se aproxima la rigidez al valor descrito.

Este fenómeno se debe a que la reducción del módulo elástico del material de soporte de losa provoca la aparición de una resonancia cuyo pico se va desplazando hacia frecuencias más bajas conforme más se reduce la rigidez, ver Ilustración 59 e Ilustración 60.

Se recuerda que la ponderación W_m aplicaba una reducción considerable a los niveles de las aceleraciones de alta frecuencia dejando los niveles de baja frecuencia prácticamente sin reducción.

Ambos fenómenos actuando de forma conjunta son los que provocan el aumento del índice Law para los nodos del edificio. Adicionalmente, se observa que sí que se produce una pronunciada atenuación (aproximadamente 20 dB por década) para frecuencias a partir de un cierto valor de frecuencia que se llamará, igual que en el caso RAIL_PAD, frecuencia de atenuación (f_{at}), si bien esta atenuación no es suficiente para compensar el aumento de los niveles a frecuencias bajas.

Siguiendo con el análisis de las curvas, para módulos elásticos por debajo de 2 MPa y conforme se va bajando más la rigidez, lo que se observan son oscilaciones en el valor del índice Law que se deben, básicamente a la superposición de dos fenómenos:

- Por una parte, el pico de la resonancia se va desplazando hacia frecuencias más bajas y va aumentando su magnitud lo cual hace aumentar el Law.
- Por otra parte, el rango de frecuencias atenuadas es cada vez mayor y con una mayor atenuación, lo cual hace disminuir el Law.

Se intuye, por la tendencia que toman los espectros, que el valor del índice Law empezaría a descender de seguir bajando el valor de la rigidez de los soportes.

Para finalizar el análisis de los espectros se centra la atención en un fenómeno que aparece aproximadamente en el rango de frecuencias cercano a los 50 Hz y que se puede observar tanto en la Ilustración 60 como en la Ilustración 61. Se observa que aparece una antirresonancia seguida de una resonancia, ambas locales, que afectan principalmente a la losa de vía y cuyo efecto se propaga, en menor magnitud, a los nodos del edificio y la calle.

La frecuencia a la que aparecen es la misma para todo el rango de rigideces porque se trata de modos propios de vibración de la losa, que se pueden observar en la Ilustración 57 y la Ilustración 58.

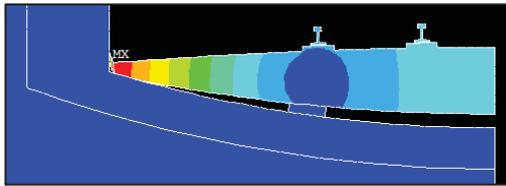


Ilustración 57. Detalle del desplazamiento de la losa para 44 Hz y $E = 3e5$ Pa

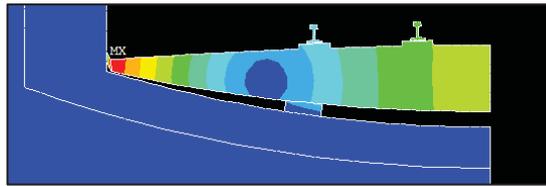


Ilustración 58. Detalle del desplazamiento de la losa para 55 Hz y $E = 3e5$ Pa

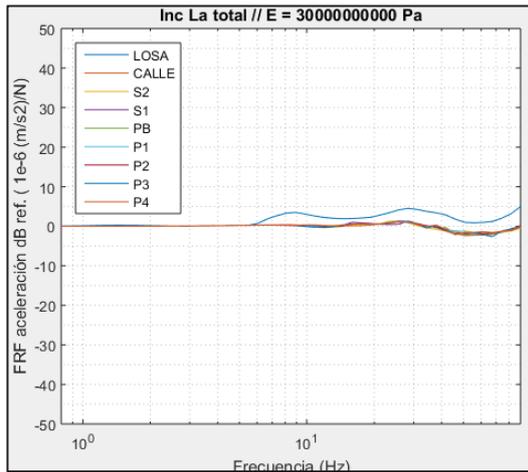


Ilustración 59. Incremento del nivel de la FRF de aceleración total con losa flotante 1

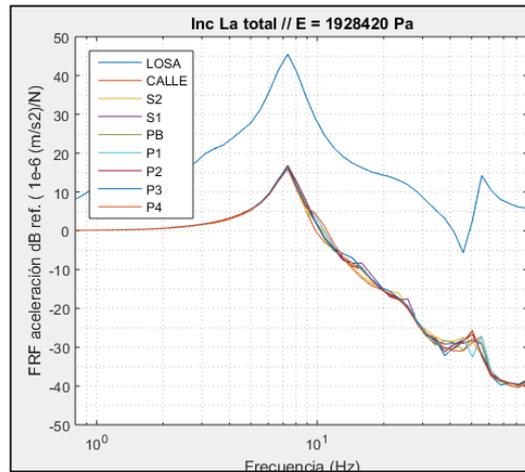


Ilustración 60. Incremento del nivel de la FRF de aceleración total con losa flotante 2

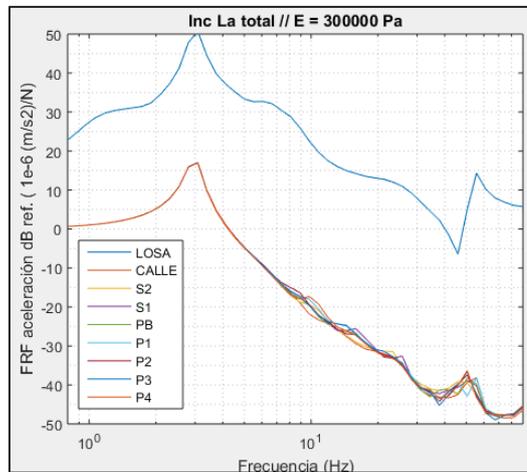


Ilustración 61. Incremento del nivel de la FRF de aceleración total con losa flotante 3

A continuación, y de manera similar a como se ha hecho con el rail pad, se analiza la relación entre el módulo elástico de los soportes de la losa y las frecuencias de resonancia y atenuación que aparecen. Obteniendo las siguientes relaciones:

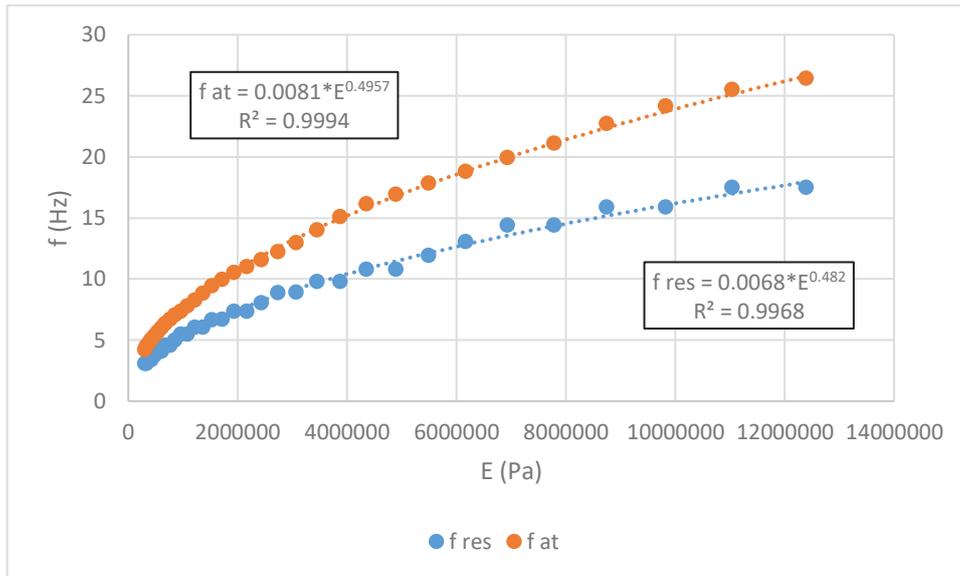


Ilustración 62. Relación entre módulo elástico y frecuencias características para el caso LOSA_FLOT

Las correlaciones para tanto la frecuencia de resonancia como la de atenuación se muestran en la gráfica y, de nuevo, se aproximan a la forma de la ecuación que determina la frecuencia de resonancia de un sistema masa muelle de 1 GDL.

Además, se cumple también una relación de proporcionalidad entre la frecuencia de resonancia y la frecuencia de atenuación representada aproximadamente mediante la ecuación siguiente:

$$f_{at} \approx 1.446 * f_{res}$$

Ecuación 15. Relación observada entre f_{res} y f_{at} para el caso LOSA_FLOT

Estas frecuencias son mucho más bajas que las que se obtenían con el rail pad de igual módulo elástico (frecuencias del orden de 10 veces menores), esto se debe a la combinación de dos factores: primero, las dimensiones del soporte de losa modelado son mucho mayores que las del rail pad modelado lo cual modifica la rigidez total del sistema (ver Ecuación 14) y, en segundo lugar, la masa añadida sobre el soporte (la de la propia losa) contribuye también a la reducción de las frecuencias características.

Se añade como apunte que los soportes de losa permiten una mayor libertad en su diseño pudiendo ser tanto bloques de elastómero de ancho, espesor y distribución libres como otro tipo de elementos, por ejemplo, resortes metálicos.

En resumen, los datos obtenidos del estudio de la losa flotante, al igual que los del rail pad, no permiten concluir si ésta es o no una medida correctora efectiva para los problemas vibratorios ocasionados por las infraestructuras ferroviarias.

Este caso, a diferencia del rail pad y como ya se ha dicho, permite una mayor libertad en el diseño con lo cual, la losa flotante es una medida con una probabilidad de funcionar bien mucho mayor que el rail pad.

Caso “BASE_EDIF”

Para el caso BASE_EDIF los resultados del índice Law son los siguientes:

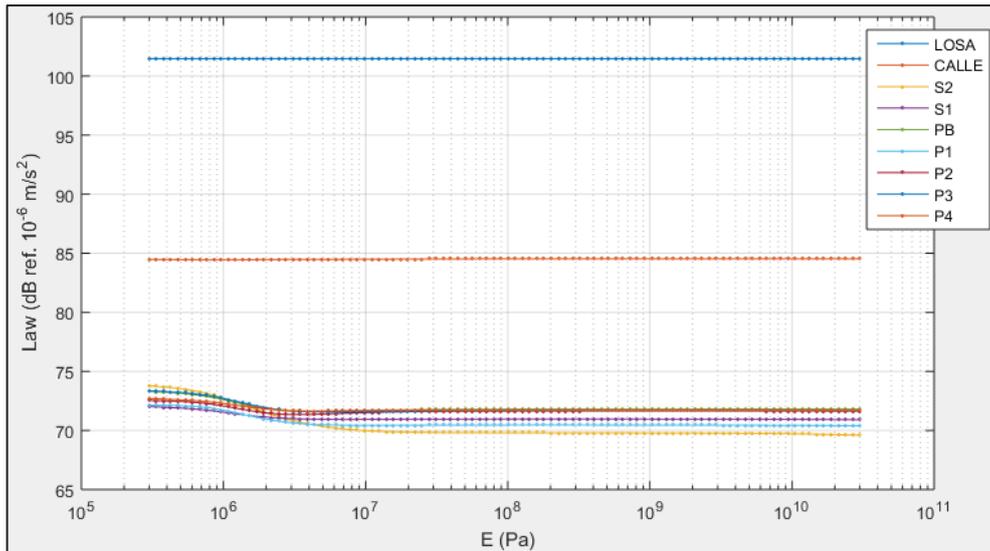


Ilustración 63. Resultados del índice Law, caso BASE_EDIF

En este caso, la modificación del módulo elástico se ha realizado en la base del edificio, en una pequeña franja de material que actúa como soporte inferior del edificio, conectándolo con el terreno subyacente.

La primera característica que se observa en este caso es la invariabilidad de los niveles tanto del nodo "LOSA", como del nodo "CALLE" con respecto a la variación del módulo elástico del soporte del edificio, este resultado era esperable ya que se trata de una medida correctora aplicada directamente en el receptor, en lugar de en el emisor o en el camino de propagación. Esto es relativamente positivo para el funcionamiento de la infraestructura de vía, ya que indica que no se ha modificado la rigidez de la misma, es decir, este tipo de medida puede ser diseñada de forma independiente a la infraestructura de vía ya que no le afecta.

En segundo lugar, se puede apreciar que los niveles de los nodos del edificio aumentan en general al reducirse la rigidez, especialmente para rigideces menores a los 10 MPa, para encontrar la razón de este aumento, se pasa a analizar los incrementos en los espectros de la FRF de aceleración tomando como referencia el caso "BASE". Se muestran a continuación algunos de estos incrementos:

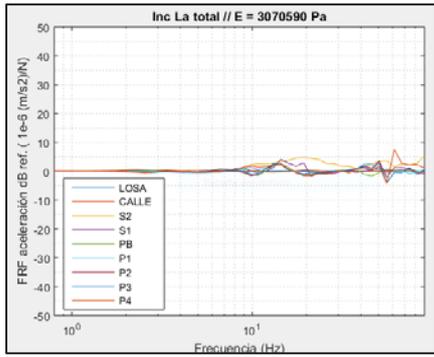


Ilustración 64. Incrementos espectros FRF aceleración caso BASE_EDIF 1

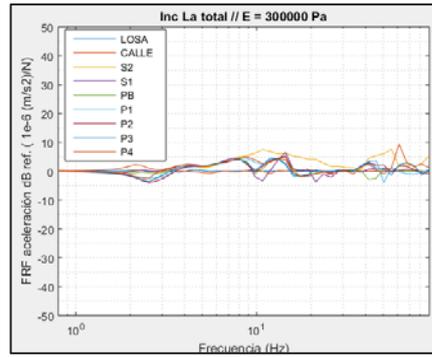


Ilustración 65. Incrementos espectros FRF aceleración caso BASE_EDIF 2

Como se puede observar en las ilustraciones superiores, la FRF de aceleración empieza aumentando para frecuencias entre los 10 y los 40 Hz aproximadamente (Ilustración 64), de forma más pronunciada para los nodos S2 y S1, los que están más próximos al terreno. Después, al bajar más el módulo elástico de la base, este aumento se propaga al rango de frecuencias entre los 3.5 y los 40 Hz seguido de una reducción de los niveles para las frecuencias por debajo de los 3.5 Hz que no llegan a compensar el aumento del resto de niveles aunque sí suavizan el aumento total del índice como se puede ver en el tramo más a la izquierda de la gráfica de la Ilustración 63.

Para entender este fenómeno, se dará un paso atrás en el análisis, volviendo a los cálculos realizados con ANSYS y consultando los resultados de amplitud de deformación para el caso con la rigidez más baja ($E = 3 \cdot 10^5$ Pa) a las frecuencias más destacables observadas: 14.4 Hz, dónde aumentan los niveles de aceleración de todos los nodos y a 2.54 Hz, dónde se reducen.

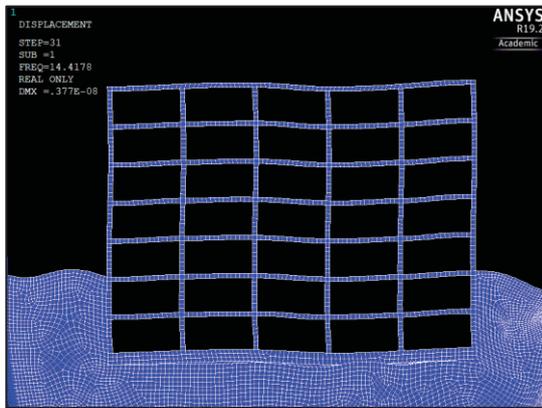


Ilustración 66. Deformación del edificio a 14.4 Hz en el caso BASE_EDIF con $E=3e5$ Pa (amplificada 10^9 veces)

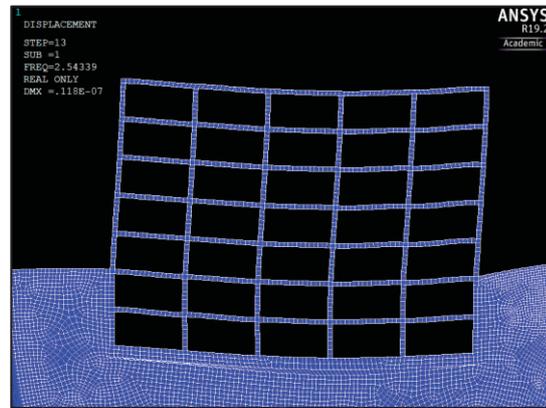


Ilustración 67. Deformación del edificio a 2.54 Hz en el caso BASE_EDIF con $E=3e5$ Pa (amplificada 10^8 veces)

Tanto en la Ilustración 66 como en la Ilustración 67 se observa como el movimiento del terreno bajo el edificio está prácticamente desvinculado del movimiento de la losa inferior del mismo, la pérdida de esta restricción, combinada con el hecho de que las fachadas de los sótanos siguen en contacto directo con el terreno, hace que la manera de vibrar del edificio cambie, atenuando menos las ondas transversales que recibe del terreno ya que ha perdido la rigidez vertical que le aportaba la base. Pasa

así a vibrar de un modo que le es más propicio justamente a los modos menos amortiguados del edificio resultando esto en un aumento general de los valores del índice Law.

El descenso observado en las frecuencias cercanas a los 2.5 Hz se debe a la aparición de un modo de vibración a esa frecuencia que justamente afecta poco a los nodos sondeados. No se observa una relación sencilla entre la rigidez que se ha tomado como parámetro y esta reducción que permita aprovechar y ampliar sus efectos de forma provechosa para la reducción de las vibraciones.

Con lo observado anteriormente, este estudio no permite identificar si la colocación de material elástico en la base de un edificio puede contribuir de forma positiva al confort de sus ocupantes.

Se pasa ahora a analizar el último caso de carga, el relativo a la medida correctora consistente en la excavación de zanjas.

Caso “ZANJAS”

Para el caso ZANJAS los resultados del índice Law se mostrarán como incrementos respecto al caso BASE y, además, dado que los resultados de este caso no muestran la evolución continua del índice con respecto a un parámetro (el módulo elástico en los otros casos) sino que se trata de resultados discretos se mostrarán de forma diferente para mejorar su interpretación.

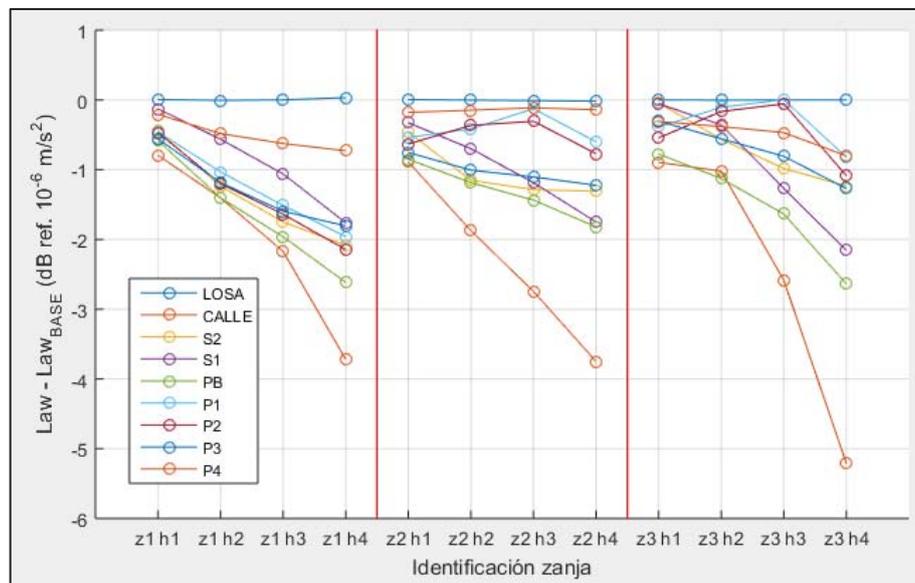


Ilustración 68. Resultados del índice Law, caso ZANJAS

En primer lugar, se explicará la notación utilizada: los tres grupos de curvas mostrados se refieren a cada una de las tres posiciones de la zanja indicadas en el apartado “Zanjas”, la etiqueta del eje horizontal, “z1”, indica la posición de la zanja, siendo 1 la más cercana al túnel y 2 la intermedia y 3 la más cercana al edificio. El efecto de cada una de las zanjas se ha estudiado de forma independiente al resto, es decir que, si en un análisis determinado se ha modelado la zanja z2 (con su respectiva profundidad), en éste mismo análisis no se habrán modelado ni la z1 ni la z3. Por otra parte, la etiqueta “h1” indica la profundidad de la zanja, indicando el número el valor de la profundidad en metros.

Dicho esto, se recuerda que el nodo con la etiqueta "CALLE" se encuentra entre el edificio y la posición de zanja z3, en otras palabras, siempre está tras la zanja en el camino de propagación de las vibraciones.

Se pasa ahora al análisis de los resultados propiamente dichos. Primeramente, se puede ver que el nodo LOSA no modifica apenas su comportamiento con la inclusión de las zanjas lo cual indica que la inclusión de estos elementos no afecta apenas al comportamiento dinámico de la vía, esto independiza su diseño del de la infraestructura de vía, al igual que ocurría en el caso BASE_EDIF.

En segundo lugar, se observa que el efecto de las zanjas es uniformemente positivo, reduciendo en todas las posiciones y profundidades el índice Law. También se observa que su efecto no es igual para todos los nodos sondeados, esto indica que la inclusión de las zanjas modifica la forma de propagación de las ondas por el edificio, esto ocurre porque la zanja es un obstáculo en la propagación de las ondas generando fenómenos de reflexión y difracción que modifican en gran medida la forma de la onda propagada.

Además, se aprecia que una mayor profundidad de las zanjas revierte en una mayor atenuación en prácticamente todos los casos y que el aumento de profundidad es más efectivo para la zanja z1 que para las otras con lo cual se puede deducir que las zanjas funcionan mejor como medida correctora cuanto más próximas y profundas se encuentran a la fuente, un principio de diseño muy similar al que se aplica para el diseño de las pantallas acústicas.

Continuando con las observaciones, también se ve que, para la profundidad mínima, la de 1 m, los resultados varían poco con la posición de la zanja, esto se puede deber a que, para profundidades tan bajas de zanja, las únicas ondas bloqueadas son las superficiales, cuya amplitud apenas varía con la distancia al foco.

Por último, la irregularidad en la atenuación media provocada por la zanja z2 (la zanja z2 atenúa menos que las otras 2, en lugar de tener una atenuación intermedia entre éstas) puede deberse a que, debido a que la fuente de vibraciones (el túnel) se sitúa a una cierta profundidad, la zanja z1 bloquea las ondas generadas por la parte superior del túnel y la z3 está cerca del edificio bloqueando así las ondas justo antes de llegar a éste, la zanja z2 está en una posición que no le permite realizar ni una ni otra función correctamente.

En resumen, los resultados del análisis realizado muestran que la excavación de zanjas tiene, en general, un buen efecto corrector para las molestias ocasionadas por vibraciones. Desgraciadamente, este método es habitualmente o bien inviable porque el entorno no permite su aplicación o bien de alto coste. Su homólogo para ruido aéreo, las pantallas acústicas, es de hecho el método preferido para la atenuación del ruido ambiental ocasionado por infraestructuras como carreteras o ferrocarriles.

Conclusiones

Tras la realización del trabajo, se considera que el análisis de la propagación de las vibraciones de origen ferroviario mediante el método de los elementos finitos es una herramienta que puede resultar útil para la valoración de los efectos que puede tener en su entorno una nueva línea de ferrocarril o la modificación de una línea existente.

No obstante, el uso del método de los elementos finitos para este tipo análisis implica un alto grado de complejidad debido a la gran cantidad de datos necesarios para que los resultados sean relevantes y próximos a la realidad. Se está hablando de información detallada de geometrías, materiales y sus modelos de comportamiento.

Además, el método de los elementos finitos, por sus características y por el modo en que ha sido utilizado en este caso para resolver problemas dinámicos en régimen estacionario senoidal, incluye contratiempos propios que se deben resolver para mantener la fiabilidad de los resultados tales como el truncamiento del dominio o el control del tamaño de los elementos.

También se debe tener en cuenta que no es un método que ofrezca resultados inmediatos, sino que requiere dedicar una buena parte del tiempo al tratamiento e interpretación de los resultados obtenidos del programa, que se recuerda, no son más que los desplazamientos de los nodos.

La libertad que ofrece el MEF en la realización del modelo permite además enfocar el análisis desde distintos puntos de vista. Se puede enfocar viendo el sistema como una simple función de transferencia y estudiarlo en el dominio de la frecuencia como en el presente trabajo, o se puede enfocar desde el punto de vista transitorio observando cómo reacciona en el tiempo a un impulso o a una señal más compleja como pueda ser la fuerza real registrada en un tren. También se puede realizar el análisis en tres dimensiones, al contrario que aquí, registrando la propagación completa de la onda. Pero cada opción conlleva una serie de ventajas y desventajas, por ejemplo, un análisis transitorio conlleva un mayor tiempo de cálculo y otros problemas como la elección del paso de tiempo para la integración a cambio de una mayor información del comportamiento del sistema y un análisis tridimensional implica un notable incremento en el número de elementos y el tiempo de cálculo a cambio de la obtención de datos de un grado más de libertad.

En este trabajo se ha diseñado y seguido un procedimiento buscando un balance entre complejidad, claridad y precisión, teniendo en cuenta las limitaciones de software y hardware disponibles. Aplicando este método se ha analizado un caso tipo determinado (el caso BASE) y se han analizado las características de la propagación de las vibraciones en él, estableciendo así un patrón para comparar con los casos posteriores.

Después, con este procedimiento se han podido comparar los resultados de las medidas correctoras seleccionadas.

En primer lugar, no se puede concluir que las fijaciones elásticas (rail pad), contribuyan a la reducción de las vibraciones propagadas a los edificios. Si bien la tendencia de las frecuencias de resonancia y atenuación muestran que puede haber valores de rigidez total suficientes para la reducción de las vibraciones, no se ha podido demostrar que estos valores de rigidez sean realizables con unos parámetros de diseño realistas.

Por otra parte, la losa flotante, arroja resultados similares a las fijaciones elásticas, aunque permite una mayor libertad en su diseño lo cual puede permitir llegar a los valores de rigidez necesarios para que sea una medida efectiva. Esta libertad en el diseño viene acompañada también de un mayor coste con respecto al rail pad.

En cuanto a la manta elástica situada bajo el edificio, su efecto reductor de vibraciones en el edificio no ha podido ser demostrado, esto puede deberse a alguna de las simplificaciones tomadas en la ejecución del modelo o a una incorrecta aplicación en el modelo de esta medida.

Por último, la excavación de zanjas paralelas al eje de vía, ha provocado una notable reducción en los niveles de vibración del edificio, verificando así su efectividad. La efectividad de esta medida es mayor cuanto más profundas y cercanas a la vía se sitúen estas zanjas.

Con esto, se dan por concluidos los objetivos planteados al inicio del trabajo.

Futuros trabajos

Como futuros trabajos se pueden plantear diversas líneas.

En primer lugar, se puede mejorar el modelo de cálculo utilizado. Entre las mejoras posibles destacan: el paso a un modelo tridimensional, el análisis del fenómeno como transitorio, la inclusión de la estratificación del terreno con sus capas, el uso de modelos de material que sean más fieles al comportamiento real de los materiales o la inclusión del material rodante completo y no solo como una fuerza.

Además, se podrían analizar otras configuraciones del modelo que no se han realizado en este caso. Por ejemplo, variando la distancia del edificio a la vía o con otras infraestructuras de vía (vía en superficie, viaducto) u otras configuraciones de vía (balasto) o probando otras medidas correctoras.

Por último, se podría comprobar la fidelidad del modelo a la realidad realizando medidas reales de vibración y comparándolas con un modelo del mismo sistema medido.

Bibliografía

- (2019). Obtenido de Jsg.utexas.edu: <http://www.jsg.utexas.edu/tyzhu/files/Some-Useful-Numbers.pdf>
- AENOR. (Julio de 2008). UNE-ISO 2631-1. Madrid, Comunidad de Madrid, España.
- AGICO GROUP. (2019). *How Much Do You Know About the Types of Rail Pads*. Obtenido de Railroadfastenings.com: <http://www.railroadfastenings.com/blog/types-of-rail-pads.html>
- Álvarez Rodríguez, J. (2010). *Ingeniería ferroviaria*. Madrid: Juan de la Cuesta.
- ArcelorMittal. (2019). *60E1 (UIC60) Rail - ArcelorMittalRails*. Obtenido de Rails.arcelormittal.com: <https://rails.arcelormittal.com/tipos-rieles/carril-de-transporte/norma-europea/carril-uic60-60e1>
- Bobo11. (2019). *Flat Spot - Wikipedia*. Obtenido de Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Flat_spot#/media/File:Flachstelle.JPG
- European Commission. (2011). *Roadmap to a Single European Transport Area: Towards a Competitive and Resource Efficient Transport System: White Paper*. Publications Office of the European Union.
- Freund, L. B. (1998). *Dynamic Fracture Mechanics*. Cambridge University Press.
- Geotechdata.info. (17 de 09 de 2013). *Soil Elastic Young's Modulus - Geotechdata.info*. Obtenido de Geotechdata.info: <http://geotechdata.info/parameter/soil-elastic-young-modulus.html>
- Giarrusso, L. (2019). *The product*. Obtenido de Greenrail: <http://www.greenrailgroup.com/en/the-product/>
- Hanson, C., Ross, J., D.A., T., & Harris, M. (2012). *High-speed ground transportation noise and vibration impact assessment (No. DOT/FRA/ORD-12/15)*. EE. UU.: Federal Railroad Administration. Office of Railroad Policy and Development.
- IBERISA. (2019). *Reglas Básicas de Mallado por Elementos Finitos*. Obtenido de IBERISA: http://www.iberisa.com/soporte/femap/reglas_mallado.htm
- Jingbo, L., Yixin, D., Xiuli, D., Zhenyu, W., & Jun, W. (2006). 3D viscous-spring artificial boundary in time domain. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 5(1), 93-102.
- Lindosland. (2019). *A-weighting - Wikipedia*. Obtenido de Wikipedia: <https://en.wikipedia.org/wiki/A-weighting>
- Lysmer, J., & Kuhlemeyer, R. L. (1969). Finite dynamic model for infinite media. *Journal of the Engineering Mechanics Division* 95(4), 859-878.
- NoahMitchell. (2019). *Wave speeds of an isotropic elastic medium - Rayleigh wave - Wikipedia*. Obtenido de Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/File:Wave_speeds_of_an_isotropic_elastic_medium.png
- OTLE. (2018). *Indicadores del OTLE*. Obtenido de Portal del Observatorio del Transporte y la Logística en España: <http://observatoriotransporte.fomento.es/BDOTLE/indicadores.aspx>

- PRC Ltd. (2019). *Infrastructure | The Railway Technical Website | PRC Rail Consulting Ltd*. Obtenido de Railway-technical.com: <http://www.railway-technical.com/infrastructure/>
- Real Academia de Ingeniería. (2019). *Diccionario Español de Ingeniería*. Obtenido de <http://diccionario.raing.es/es/lema/vibraci%C3%B3n>
- Real, T., Zamorano, C., Ribes, F., & Real, J. (2014). Train-induced vibration prediction in tunnels using 2D and 3D FEM. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 376-383.
- Sharcnet. (2019). *Mechanical APDL Documentation*. Obtenido de Mechanical APDL Documentation: https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/16.2.3/en-us/help/ai_sinfo/ans_intro.html
- Specifier. (2019). *Sub Ballast Matting - Specifier*. Obtenido de Specifier: <https://specifier.com.au/products/construction/sub-ballast-matting/>
- V.Krylov, V. (1995). Generation of ground vibrations by superfast trains. *Applied Acoustics Volume 44 issue 2*, 149-164.
- Vér, I. L., & Beranek, L. L. (2010). *Noise and vibration control engineering*.
- Williams, S. D. (2017). *Transportation Energy Data Book: Edition 36*. Oak Ridge, TN (USA): Oak Ridge National Lab (ORNL).
- Yang, Y., Liang, X., Hung, H.-H., & Wua, Y. (2017). Comparative study of 2D and 2.5D responses of long underground tunnels. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 86–100.

ANEXO I: APLICACIÓN PRÁCTICA DE LA CONDICIÓN DE CONTORNO ABSORBENTE

Para la aplicación de la condición de contorno absorbente descrita en el apartado “Truncamiento del dominio: condición de contorno absorbente”, es necesario tener definidos algunos elementos del modelo, a saber:

- Geometría definida y mallada, puesto que se necesita el tamaño del elemento en la frontera del dominio. Se recuerda que esta frontera debe tener forma semicircular para que las constantes elásticas sean valores fijos.
- Materiales definidos, porque sus propiedades afectan al cálculo de las constantes elásticas de los resortes y amortiguadores que conforman la condición de contorno.

Una vez cumplidos estos requisitos se pasa a la generación de la condición de contorno propiamente dicha realizando los pasos siguientes:

1. Se genera un nuevo tipo de elemento “ELEMENT TYPE” mediante el menú PREPROCESSOR -> ELEMENT TYPE -> ADD/EDIT/DELETE. El código del tipo de elemento necesario es “COMBIN14”, es un elemento definido por 2 nodos (ver elemento superior en Ilustración 69). En cuanto a las opciones del elemento se elige como tipo de solución la solución lineal y como grados de libertad los longitudinales en 2D. Este paso define el elemento en sí y como se debería incluir en los sistemas de ecuaciones internos del programa. Como se puede ver en la Ilustración 69, este elemento incluye tanto el resorte como el amortiguador en paralelo, de ahí su nombre.

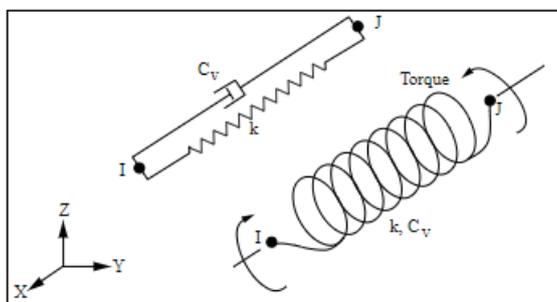


Ilustración 69. Esquema del elemento COMBIN14 (Sharcnet, 2019)

2. A continuación, se crean 2 conjuntos de constantes, esto es, 2 conjuntos de números que se asociarán a parámetros de elementos. Estos conjuntos de constantes contendrán los valores de los parámetros de rigidez y viscosidad de los resortes y amortiguadores. Este paso se realiza mediante el menú PREPROCESSOR -> REAL CONSTANT SET -> ADD/EDIT/DELETE. Se añaden 2 “sets”, uno para los resortes y amortiguadores normales y otro para los tangenciales, introduciendo en los parámetros K y CV1 sus valores correspondientes.
3. El siguiente paso consiste en seleccionar los nodos a los que se desea aplicar la condición de contorno, los pertenecientes a la frontera de truncamiento. Este paso se realiza mediante el menú SELECT -> ENTITIES... -> NODES.
4. También se deberá añadir un “keypoint” (KP) en el centro del arco de circunferencia formado por la frontera de truncamiento (PREPROCESSOR -> MODELING -> CREATE -> KEYPOINTS). Este

KP servirá como punto guía para situar los elementos COMBIN14 correctamente orientados respecto a la frontera de truncamiento.

5. Se ejecuta la macro APDL siguiente guardándola en un bloc de notas en directorio de proyecto (File -> Change Directory...) y cambiando su extensión a “.mac” e introduciendo el nombre del archivo en la barra de comandos. En cierto punto de la macro se pedirá al usuario seleccionar el KP creado en el punto 4.

```

!INICIO CONTEO Y LISTADO NODOS
*get,max_nodo,node,,num,max
aux=0
*dim,sel,,max_nodo
*vget,sel(1),node,1,nsel
*DO, i , 1,max_nodo
  *IF,sel(i),GT,0,THEN
    aux=aux+sel(i)
  *ENDIF
*ENDDO
*dim,listanodos,,aux
listanodos(1)=NDNEXT(1)
*DO, i , 2,aux
  listanodos(i)=NDNEXT(listanodos(i-1))
*ENDDO
!FIN CONTEO Y LISTADO NODOS

!PETICION DE CENTRO DE CIRCULO A USUARIO
*MSG, UI
Selecciona centro circulo.
KSEL,S,P

!INICIO GENERACION AUTOMATICA ELEMENTOS
Kc=KPNEXT(1)
Kcx=KX(Kc)
Kcy=KY(Kc)
TYPE,2 !ESTE NUMERO DEBE SER EL ASIGNADO AL TIPO DE ELEMENTO COMBIN14
*DO,i,1,aux
  theta=ATAN2(NY(listanodos(i))-Kcy,NX(listanodos(i))-Kcx)
  !ELEMENTO NORMAL
  REAL,1 !NUM. DE REAL CONSTANT SET ASIGNADO AL ELEMENTO NORMAL
  N,listanodos(i)+1000000,NX(listanodos(i))+10*COS(theta),NY(listanodos(i))+10*SIN(theta), 0
  E,listanodos(i),listanodos(i)+1000000,
  !ELEMENTO TANGENTE
  REAL,2 !NUM. DE REAL CONSTANT SET ASIGNADO AL ELEMENTO TANGENCIAL
  N,listanodos(i)+2000000,NX(listanodos(i))+10*SIN(theta),NY(listanodos(i))-10*COS(theta), 0
  E,listanodos(i),listanodos(i)+2000000,
*ENDDO
!FIN GENERACION AUTOMATICA ELEMENTOS

```

Código de macro de generación automática de elementos de frontera

PRESUPUESTO

En esta parte del documento se detalla el presupuesto de los trabajos:

Coste unitario de los materiales y mano de obra

En la tabla siguiente se calculan los precios unitarios de los materiales y personal utilizados en los trabajos:

Costes unitarios				
Concepto	Descripción	Coste total (€)	Período (h)	Precio unitario (€/h)
Ordenador	Ordenador gama media (PC + periféricos)	800	10000	0.0800
Licencia ANSYS	Licencia anual ANSYS MECHANICAL - 1 usuario*	36390	1800	20.2167
Ingeniero/a Industrial	Salario ingeniero/a industrial	23618.28	1800	13.1213

*En este trabajo los cálculos y modelos se han realizado con la versión Student de ANSYS, pero para un trabajo con fines lucrativos se tendría que usar una versión profesional.

Capítulos

A continuación, se detallan los costes de los capítulos o unidades en que se subdividen los trabajos:

Capítulo	Concepto	Unidades	Cantidad	Precio unitario	Importe (€)
Documentación previa	Ordenador	h	36	0.0800	2.88
	Ingeniero/a Industrial	h	36	13.1213	472.37
				Subtotal	475.25
				Costes indirectos	3%
					14.26
				TOTAL	489.51

Capítulo	Concepto	Unidades	Cantidad	Precio unitario	Importe (€)
Creación del procedimiento de cálculo	Ordenador	h	72	0.0800	5.76
	Licencia ANSYS	h	72	20.2167	1455.60
	Ingeniero/a Industrial	h	72	13.1213	944.73
				Subtotal	2406.09
				Costes indirectos	3%
					72.18
				TOTAL	2478.27

Capítulo	Concepto	Unidades	Cantidad	Precio unitario	Importe (€)
Generación de los modelos de elementos finitos	Ordenador	h	90	0.0800	7.20
	Licencia ANSYS	h	90	20.2167	1819.50
	Ingeniero/a Industrial	h	90	13.1213	1180.92
				Subtotal	3007.62
				Costes indirectos	3%
					90.23
				TOTAL	3097.85

Capítulo	Concepto	Unidades	Cantidad	Precio unitario	Importe (€)	
Postprocesado de los resultados de los modelos	Ordenador	h	108	0.0800	8.64	
	Licencia ANSYS	h	108	20.2167	2183.40	
	Ingeniero/a Industrial	h	108	13.1213	1417.10	
				Subtotal	3609.14	
				Costes indirectos	3%	108.27
				TOTAL	3717.41	

Capítulo	Concepto	Unidades	Cantidad	Precio unitario	Importe (€)	
Redacción de la memoria	Ordenador	h	54	0.0800	4.32	
	Ingeniero/a Industrial	h	54	13.1213	708.55	
				Subtotal	712.87	
				Costes indirectos	3%	21.39
				TOTAL	734.26	

Capítulo	Concepto	Unidades	Cantidad	Precio unitario	Importe (€)
Adquisición de software*	Paquete Office Home & Business 2019	-	1	250	250.00
	Matlab R2019a	-	1	2000	2000.00
				TOTAL	2250.00

*La adquisición de software es opcional ya que estos programas se pueden sustituir por otros muy similares de uso libre. El paquete Office se puede sustituir por el paquete OpenOffice y el Matlab se puede sustituir por Octave, por ejemplo. Se mostrarán dos resúmenes incluyendo y excluyendo este capítulo.

Resumen

Se muestran aquí los resúmenes de los presupuestos:

Resumen con adquisición de software	
Capítulos	Coste
Documentación previa	489.51 €
Creación del procedimiento de cálculo	2478.27 €
Generación de los modelos de elementos finitos	3097.85 €
Postprocesado de los resultados de los modelos	3717.41 €
Redacción de la memoria	734.26 €
Adquisición de software	2250.00 €

Presupuesto de ejecución material (PEM)	12767.30 €
Beneficio industrial (6%)	766.04 €

Presupuesto base licitación sin IVA	13533.34 €
IVA (21%)	2842.00 €

Presupuesto base licitación	16375.34 €
------------------------------------	-------------------

Resumen sin adquisición de software	
Capítulos	Coste
Documentación previa	489.51 €
Creación del procedimiento de cálculo	2478.27 €
Generación de los modelos de elementos finitos	3097.85 €
Postprocesado de los resultados de los modelos	3717.41 €
Redacción de la memoria	734.26 €

Presupuesto de ejecución material (PEM)	10517.30 €
Beneficio industrial (6%)	631.04 €

Presupuesto base licitación sin IVA	11148.34 €
IVA (21%)	2341.15 €

Presupuesto base licitación	13489.49 €
------------------------------------	-------------------