

UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ELCHE

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA



"MODELO NUMÉRICO DE LA
PROPAGACIÓN DE LAS
VIBRACIONES PRODUCIDAS POR LA
CIRCULACIÓN DE UN VEHÍCULO"

TRABAJO FIN DE GRADO

Febrero 2025

AUTOR: Javier Chinchilla Pastor

DIRECTOR: Miguel Fabra Rodríguez

Gracias a las personas que han hecho posible que este bonito camino llegue a su fin. Especialmente a mi familia y amigos que me han apoyado en todo momento.



Biblioteca
UNIVERSITAS Miguel Hernández

ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1.	Vibraciones	1
1.2.	Influencia de las vibraciones	3
1.2.1.	Sobre las personas.....	4
1.2.2.	Sobre las estructuras	6
1.3.	Métodos para mitigar las vibraciones generadas por el tráfico.....	7
1.4.	Vibración transmitida neumático-calzada.....	9
1.5.	Propagación de las vibraciones inducidas por el tráfico	10
2.	ESTADO DEL ARTE	13
2.1.	Monitorización del tráfico	13
2.2.	Monitorización de vibraciones para conservar edificios históricos	15
2.3.	Cálculo de vibraciones producidas por el tráfico mediante.....	18
	métodos numéricos	18
3.	OBJETIVOS.....	20
3.1	Objetivos específicos	20
4.	METODOLOGÍA DE ENSAYOS.....	22
4.1.	Instrumentación	22
4.1.1.	Acelerómetro.....	23
4.1.2.	Adquisición y procesamiento de datos	25
4.1.3.	Análisis y almacenamiento de datos	27
4.2.	Ensayos	29
4.2.1.	Metodología para la medida de vibraciones.....	29
4.2.2.	Punto de medida 1	31
4.2.3.	Punto de medida 2	33
5.	CONFIGURACIÓN DEL MODELO	35
5.1	Inicio del programa.....	35
5.2	Parametrización.....	36
5.3	Creación de la geometría.....	39
5.3.1.	Función 'Block'	40
5.3.2.	Extrusión de polígonos	40
5.3.3.	Secuencia de operaciones	42
5.4.	Elección de materiales.....	50

5.5	Configuración de la fuerza.....	52
5.6	Creación de la malla	55
6.	RESULTADOS	60
6.1	Resultados de simulaciones.....	61
6.2	Resultados de ensayos experimentales	70
6.2.1	Punto 1: Paseo de la Estación.....	70
6.2.2	Punto 2: Avenida de Jubalcoy.....	75
6.3	Resultados de ensayos en Uruguay.....	79
7.	CONCLUSIONES	82
8.	BIBLIOGRAFÍA.....	84
9.	WEBGRAFÍA.....	89
10.	ANEXOS.....	90
10.1.	Script de programa en Matlab.....	90



1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, las personas están expuestas a vibraciones en diversos entornos, ya sea en el ámbito laboral, doméstico o en la vía pública [1]. El crecimiento constante de las ciudades y el consecuente aumento de vehículos en circulación, han convertido al tránsito vehicular en un foco importante de generación de ruido y vibraciones. Estas vibraciones no solo tienen un impacto negativo en la conservación de edificios y estructuras históricas, acelerando su deterioro, sino que también afectan el bienestar y salud de las personas [2].

Existen diversos factores que influyen en la generación de estas vibraciones. Uno de los más relevantes son las irregularidades en la calzada, como grietas, desniveles o resaltos. Muchos de los edificios emblemáticos que se quieren preservar se encuentran en centros históricos cuyas calles por razones estéticas, habitualmente están hechas de piedra, lo que, sumado a un mal diseño o a un escaso mantenimiento, hacen que estas vías cuenten con grandes niveles de rugosidad e irregularidades, obligando a entidades públicas a limitar el tráfico por estas vías. Además, el tipo de vehículo y la velocidad a la que circula también desempeñan un papel fundamental en este fenómeno [2],[3].

1.1. Vibraciones

Se puede definir una vibración como la oscilación o el movimiento repetitivo de un sistema alrededor de un punto de equilibrio. Es generada cuando el sistema se desplazado desde su posición de equilibrio estable, entonces este trata de recuperar su posición inicial, bajo las fuerzas restitutivas de la gravedad o elásticas, describiendo un movimiento de vaivén hasta alcanzar de nuevo su posición de equilibrio, es decir, aquella que el sistema alcanza cuando la fuerza ejercida sobre el mismo es nula [4].

El movimiento vibratorio más sencillo y a su vez más importante es el movimiento armónico simple (MAS), en el cual la variable que fija la posición de la partícula o del sistema, respecto a su posición de equilibrio estable, es función armónica del tiempo.

Por definición, diremos que esta partícula se mueve con movimiento armónico simple cuando su posición esté dada por una expresión del tipo:

$$X = A \cdot \sin(\omega t + \varphi) \quad (1)$$

La constante **A** se denomina amplitud de la oscilación y es el mayor valor posible de la variable **X**. La cantidad $\omega t + \varphi$ se denomina fase del movimiento y a su valor φ , correspondiente al instante inicial, se le denomina fase inicial.

Por otro lado, el periodo del movimiento es el tiempo mínimo necesario para que la partícula o el sistema realicen un ciclo completo y vuelvan a ocupar la misma posición o estado; se representa mediante la letra **T**, su magnitud es un tiempo y su unidad el segundo s.

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (2)$$

La frecuencia **f**, la cual representa el número de oscilaciones que la partícula realiza en la unidad de tiempo, es la inversa del periodo, su unidad es el s^{-1} , unidad a la que se denomina hercio *Hz* y su expresión:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi} \quad (3)$$

La cantidad ω se denomina frecuencia angular, se mide en radianes por segundo *rad/s* y puede expresarse en función del periodo o de la frecuencia:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \quad (4)$$

Estos parámetros, especialmente la frecuencia f serán de especial relevancia para el análisis y estudio de los resultados obtenidos por las medidas y simulaciones [5].

En la Figura 1 se ilustra una onda senoidal en la cual hay representados los parámetros que se acaban de introducir tales como la amplitud A y el periodo T .

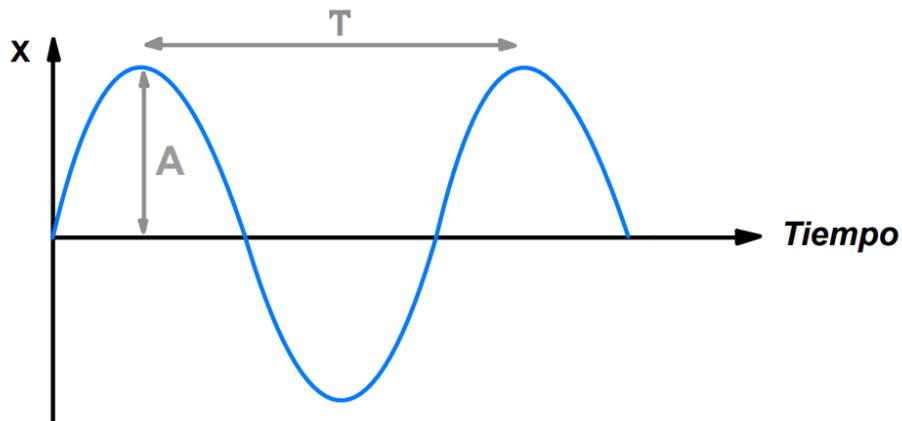


Figura 1: Representación de una onda senoidal.

1.2. Influencia de las vibraciones

Actualmente, las vibraciones generadas por el tráfico rodado han despertado un mayor interés en el mundo de la ingeniería recibiendo el nombre de contaminación ambiental física [6]. Este nombre hace referencia a las vibraciones del suelo y edificios, generados por las actividades de las personas como la circulación de vehículos o las zonas industriales, las cuales influyen negativamente en la vida cotidiana y la salud física y psicológica de los residentes que viven cerca de fuentes de vibración como calzadas o industrias [12].

Este interés se debe a los descubrimientos de las investigaciones llevadas a cabo en relación con el tema, observando serios efectos negativos tanto en las personas como en edificios y estructuras cercanas a carreteras o zonas con tráfico [6].

1.2.1. Sobre las personas

Las vibraciones generadas por el tráfico suelen causar situaciones de incomodidad en las personas que las perciben. Después de realizar algunos estudios tanto en laboratorios como en viviendas, se ha observado que el umbral de percepción de las vibraciones por parte de los seres humanos se sitúa por debajo del límite de la propia construcción [6].

Esta percepción de vibraciones en las personas se da de una forma pasiva diferenciándose dos situaciones principales: sentado o de pie y tumbado [6].

Posición sentada o de pie:

Una persona sentada recibe las vibraciones de los pies a la cabeza de modo que el eje Z es un eje vertical que recorre la espina dorsal de la persona. Por otro lado, los ejes XY toman la dirección horizontal [6],[7].

En la Figura 2 queda plasmada la interpretación de estos ejes en las posiciones especificadas.

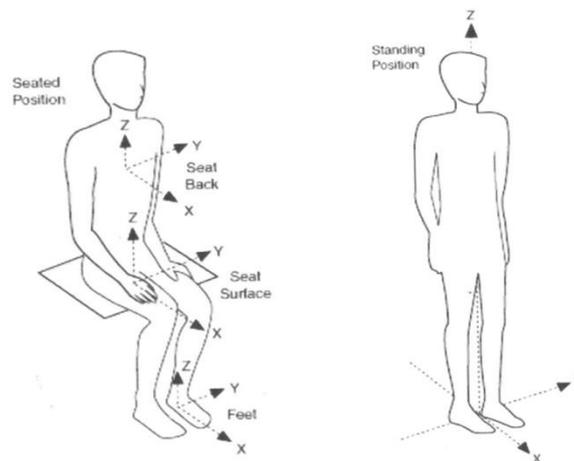


Figura 2: Representación de los ejes en los que se propagan las vibraciones percibidas [7].

Posición tumbada:

Cuando el receptor se encuentra tumbado, percibe las vibraciones por todo su cuerpo de forma que el eje Z, en esta ocasión es el horizontal (cabeza-pies) y los ejes X e Y van de espalda a pecho y de lado a lado respectivamente [6],[7].

En la Figura 3 se puede apreciar la representación de estos ejes mencionados sobre una persona acostada.



Figura 3: Representación de los ejes en los que se propagan las vibraciones percibidas [7].

La exposición prolongada a vibraciones vehiculares puede ocasionar efectos negativos en las personas fatigando el sistema nervioso, disminuyendo la sensibilidad de la vista, dificultando la inteligibilidad del habla, la comunicación y afectando negativamente al sueño y el descanso [14].

En la tabla 1 se muestran los rangos de valores de vibraciones que afectan a las personas y las consecuencias que generan [14].

Frecuencia (Hz)	Efecto en personas
4-9	Sentimiento de incomodidad
5-7	Dolor en el pecho
4-10	Dolor abdominal
4-8	Influencia en la respiración
13-20	Influencia en la comunicación verbal
13-20	Dolores de cabeza

Tabla 1: Valores de aceleración que afectan a personas [14].

1.2.2. Sobre las estructuras

Las vibraciones generadas por el tráfico rodado, además de generar molestias en la ciudadanía, son especialmente dañinas para las edificaciones que se encuentran cerca de estos focos de vibraciones [6].

Los daños más visibles en los edificios son el desprendimiento de la pintura de las paredes, grietas en las mismas y en el peor de los casos, el colapso de alguna de sus partes [6].

Se han dado casos de edificios históricos como el palacio de Villa Farnesina en Roma, que, debido a su antigüedad y a la prolongada exposición a vibraciones generadas por tráfico pesado, algunas partes de su fachada se han desprendido de la misma [10].

Una vez las vibraciones alcanzan edificios, van ascendiendo por el mismo haciendo que los valores de aceleración medidos en cada planta disminuyen entre sí [12],[13].

En edificios de gran altura, como se acaba de mencionar, la distribución de vibraciones en función de los niveles del piso es diferente. Una medida reciente realizada por la Universidad Jiaotong de Beijing muestra que las vibraciones medidas entre el tercero y el séptimo piso son relativamente mayores que las captadas en el suelo y los pisos superiores [12].

En la Figura 4 se muestra una gráfica que muestra el valor de la aceleración las diferentes plantas de un edificio según el estudio de la universidad de Beijing, confirmando lo expuesto previamente.

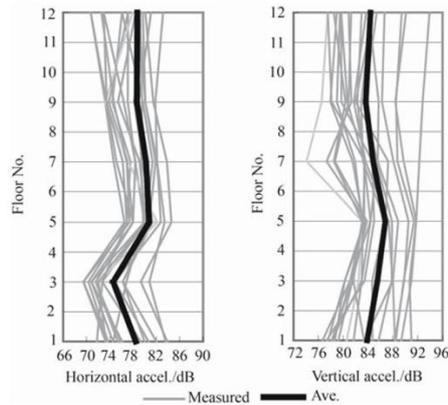


Figura 4: Variedad de las aceleraciones en cada planta según el estudio de la universidad de Beijing [12].

El incremento de estas vibraciones también depende del material en el que se haga el edificio, encontrando un mayor aumento de las vibraciones en aquellas casas hechas de madera por el contrario las de hormigón no aumenta tanto la vibración captada desde el suelo [12].

1.3. Métodos para mitigar las vibraciones generadas por el tráfico

Como ya se ha visto en los apartados anteriores, las vibraciones tienen efectos negativos sobre las construcciones y las personas, por este motivo la búsqueda de métodos para mitigarlas está al orden del día.

A continuación, se realiza una clasificación de los diferentes métodos empleados:

Aislamiento directo del edificio:

El aislamiento de edificios contra vibraciones generadas por tráfico busca minimizar el impacto de las ondas generadas tanto por vehículos como por trenes. Esto se alcanza gracias a sistemas como bases de materiales elásticos entre el edificio y el suelo o materiales absorbentes, instalados en los cimientos del edificio. Gracias a estos mecanismos, se logra reducir la transmisión de vibraciones por la estructura, protegiéndola y mejorando el confort de los ocupantes [6],[13].

Barreras físicas:

Es habitual circular por autovías y observar barreras físicas colocadas a ambos lados cuando esta cruza por zonas habitadas. Estas barreras no solo ayudan a interceptar las ondas en la trayectoria de propagación para reflejarlas y minimizar el ruido percibido por los habitantes de la zona, sino que también ayudan a mitigar las vibraciones que este ruido trae consigo asociadas [13].

Sistemas activos de control de vibraciones:

Los sistemas AVC por sus siglas en inglés (Active Vibration Cancelling), utilizan sensores y actuadores para detectar y contrarrestar vibraciones en tiempo real. Estos sistemas suelen emplear bucles de retroalimentación y unidades de control electrónico para aplicar fuerzas que cancelan las vibraciones entrantes, aislando eficazmente los equipos o estructuras sensibles de perturbaciones no deseadas [13].

Actúan de forma similar a los equipos de cancelación de ruido ANC (Active Noise Cancelling), superponiendo las señales de ruido o vibración no deseadas con una señal de cancelación de exactamente la misma magnitud y una diferencia de fase de 180° [15].

Medidas convencionales:

Una de las medidas más habituales y respaldada por artículos para solucionar los problemas de vibraciones generadas por el tráfico es reasfaltar la calzada, eliminando de este modo la gran mayoría de irregularidades que se encuentran en el firme [6],[10],[12].

Además, diversos estudios coinciden en que la reducción de la velocidad máxima de la vía, así como la limitación del peso máximo de los vehículos que circulan por ella, influye positivamente en la mitigación de vibraciones [6],[12].

1.4. Vibración transmitida neumático-calzada

La vibración transmitida por el suelo debida al tráfico vehicular está influida por diversos factores como el material de la calzada, su estado, la velocidad y peso de los vehículos y la frecuencia de paso de estos. Además, los materiales empleados en su construcción como grava, asfalto o concreto cuentan con distintas propiedades mecánicas teniendo cada uno un impacto diferente en la generación de vibraciones [6],[11].

Otro factor de especial relevancia es el contacto neumático-calzada. Debido a los efectos de la carga del vehículo y la rugosidad del pavimento, el neumático se comprime y deforma durante el rodamiento, lo que provoca que la velocidad hacia adelante del neumático se descomponga en una dirección vertical y una dirección horizontal. Parte de la energía cinética del neumático se convierte en vibración de la banda de rodadura y vibración de los flancos del neumático. En la Figura 5 se puede apreciar esta deformación del neumático [16].

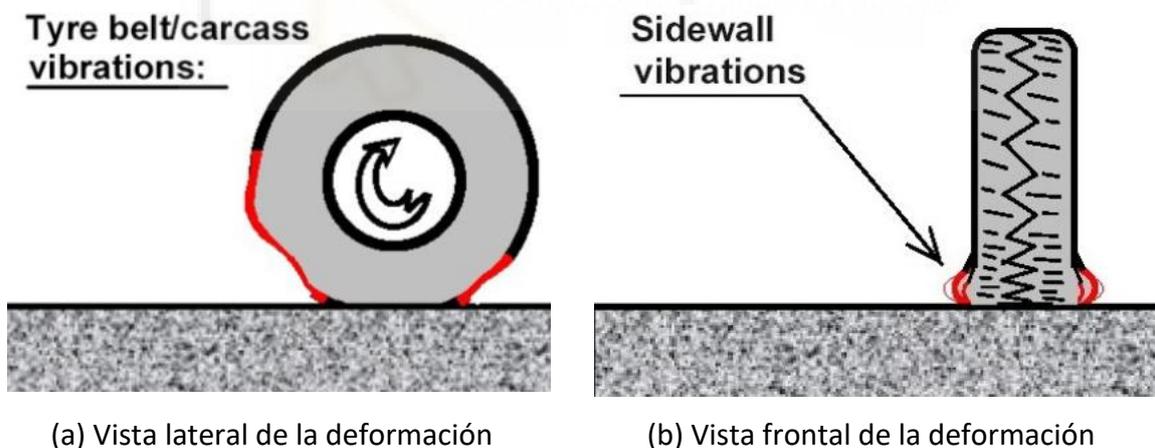


Figura 5: Vibración y deformación del neumático [16].

El mecanismo de generación de vibraciones expuesto es similar al de un pequeño martillo de goma golpeando el pavimento, siendo este martillo, los tacos de goma que forman la banda de rodadura del neumático. En la Figura 6 puede apreciarse representado este fenómeno [16].

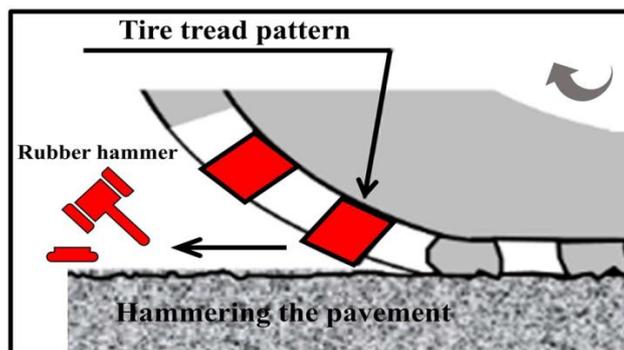


Figura 6: Mecanismo de generación de vibraciones [16].

Por último, resulta relevante mencionar la relevancia de las irregularidades del firme en la generación de vibraciones, pudiendo clasificarse en dos tipos diferentes:

Aleatorias:

Se caracteriza principalmente por la rugosidad del firme, sin embargo, el uso y desgaste de la calzada generan la aparición de otro tipo de irregularidades aleatorias como grietas, baches u ondulaciones debidas al tráfico pesado [6],[11].

Específicas:

Entre estas irregularidades específicas se encuentran aquellas que están colocadas de una manera intencionada como resaltos, bandas sonoras o pavimento acústico. Estas modificaciones del firme provocan que, la fuerza del neumático transmitida al suelo al impactar con ellas aumente considerablemente [6],[11].

1.5. Propagación de las vibraciones inducidas por el tráfico

La propagación de la vibración inducida por el tráfico depende de diversos factores como la distancia desde el receptor, la frecuencia de la vibración, la topografía entre la fuente y el receptor y las características geotécnicas del terreno demostrándose que los suelos secos de arena y grava tienen la mayor capacidad para absorber vibraciones, mientras que la arcilla blanda tiene la menor.

En la Figura 7 se aprecia la influencia del tipo de suelo en la propagación, así como el hecho de que valor de la máxima velocidad de vibración se atenúa a medida que el receptor está más alejado de la fuente [11].

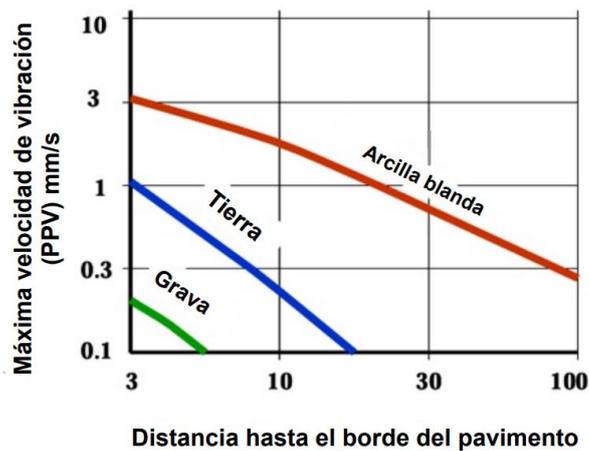


Figura 7: Efectos del tipo de suelo en la propagación de vibraciones [11].

Estas vibraciones se propagan como ondas de compresión P y corte S por el terreno y a lo largo de la superficie como ondas Rayleigh [8],[11],[19].

En la Figura 8 puede apreciarse la representación de la propagación de estas ondas a lo largo de todo el terreno [11].

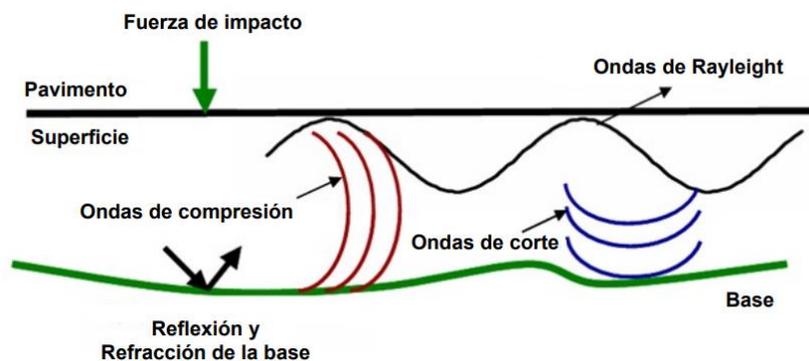


Figura 8: Representación de la propagación de ondas por el terreno [11].

Las ondas de Rayleigh son la forma más importante de propagación de las vibraciones inducidas por el tráfico y se ha demostrado que a medida que se propagan hacia el interior del terreno, su amplitud y energía disminuyen debido a la mayor absorción y disipación en los diferentes materiales del suelo a distintas profundidades [11],[12].



2. ESTADO DEL ARTE

2.1. Monitorización del tráfico

La monitorización del tráfico en ciudades avanzadas ayuda a mejorar el flujo de circulación, ayudando a optimizar la coordinación de semáforos, reducir accidentes, detectar atascos y, por ende, reducir el tiempo de los desplazamientos. Detectores de tráfico tradicionales como video cámaras suelen situarse en puntos fijos, limitando así la monitorización continua del tráfico. Para tratar de solventar este inconveniente se están desarrollando métodos alternativos [19], [22].

Una alternativa a los métodos convencionales es controlar el tráfico mediante el uso de acelerómetros. En el presente estudio se hace uso de cuatro acelerómetros colocados en línea separados entre sí por una distancia d tal y como se muestra en el montaje de la Figura 9.



(a) Set up del ensayo



(b) Montaje de un acelerómetro

Figura 9: Set up de las medidas [19].

Una vez que el vehículo pasa por delante de los acelerómetros, estos captan las vibraciones generadas por su paso, pero desplazadas en el tiempo como se muestra en la Figura 10.

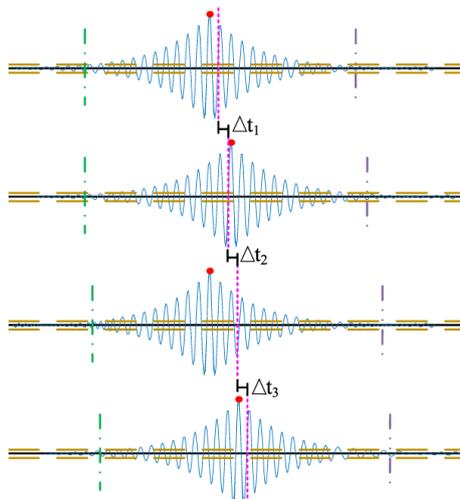


Figura 10: Desplazamiento en el tiempo del valor máximo de la aceleración para los cuatro acelerómetros [19].

Para lograr medir la velocidad V se considera la distancia Δd entre dos sensores y el desplazamiento temporal Δt entre los valores máximos medidos por cada acelerómetro, es decir, la velocidad se podrá calcular utilizando parejas de acelerómetros.

$$V = \frac{\Delta d}{\Delta t} = \frac{d_{(s_{i+1}-s_i)}}{t_{(s_{i+1}-s_i)}} \quad (5)$$

Con esta expresión se obtiene la velocidad asociada a cada pareja acelerómetros y finalmente se realiza la media de los tres intervalos para hallar la velocidad real de circulación del vehículo.

Para la determinación del sentido de circulación, la convención utilizada es que, si la diferencia de tiempo es mayor que cero, el vehículo circulaba por el carril donde se realiza la medida, pero si es menor que cero, el vehículo circulaba por el carril opuesto como se ilustra en la Figura 11.

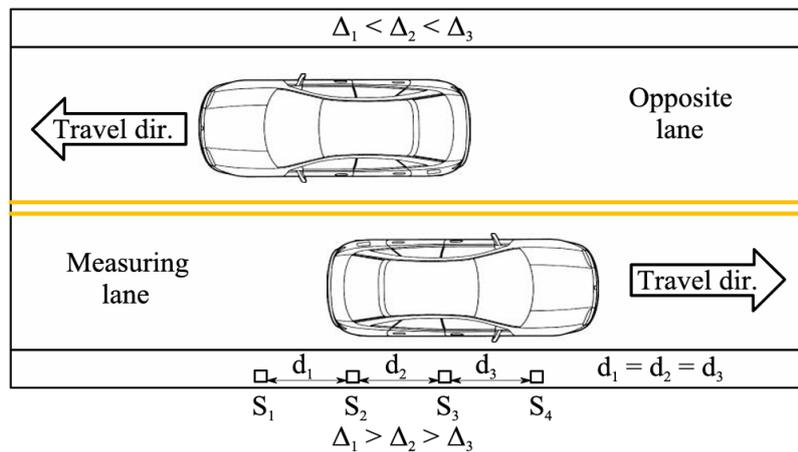


Figura 11: Determinación del sentido de circulación [19].

Con el desarrollo del estudio, se propone una red de acelerómetros interconectados entre sí, para crear una carretera inteligente capaz de monitorizar las condiciones del tráfico en todos los puntos de una carretera.

Además de implementar acelerómetros para la medida de la velocidad y la dirección del tráfico, hay estudios centrados en clasificar el tipo de vehículo que circula gracias a un micro-acelerómetro montado en la superficie de la carretera, diferenciándolos entre Diesel, gasolina y Diesel pesado según el espectro de frecuencias que genera pudiendo crear así una red de carreteras inteligente [21], [22].

2.2. Monitorización de vibraciones para conservar edificios históricos

El impacto de las vibraciones inducidas por el tráfico no supone un peligro para aquellas edificaciones de nueva construcción, pero sí que puede contribuir en su paulatino deterioro.

Sin embargo, las vibraciones de pequeña amplitud que se repiten durante un elevado número de ciclos, sí que pueden suponer un problema para aquellas edificaciones históricas de ciudades rodeadas de tráfico. Un claro ejemplo del efecto de las vibraciones inducidas por el tráfico es el edificio histórico de Villa Farnesina, en Roma, el cual comenzó a sufrir deterioros en su fachada.

Focalizando el estudio en este edificio, se tuvieron en cuenta dos fuentes de información, las vibraciones vehiculares recogidas por acelerómetros colocados al borde de la calzada colindante a la edificación y, además, las vibraciones registradas tras hacer impactar una masa de 70 kg de peso desde 2 metros de altura, simulando el impacto de una rueda en una irregularidad de la calzada.

En la Figura 12 queda plasmada la disposición de los acelerómetros a lo largo de toda la calzada vecina al edificio durante el experimento, cabe destacar que las medidas también se realizaron dentro del edificio para cuantificar la energía en forma de vibración llegada hasta él.

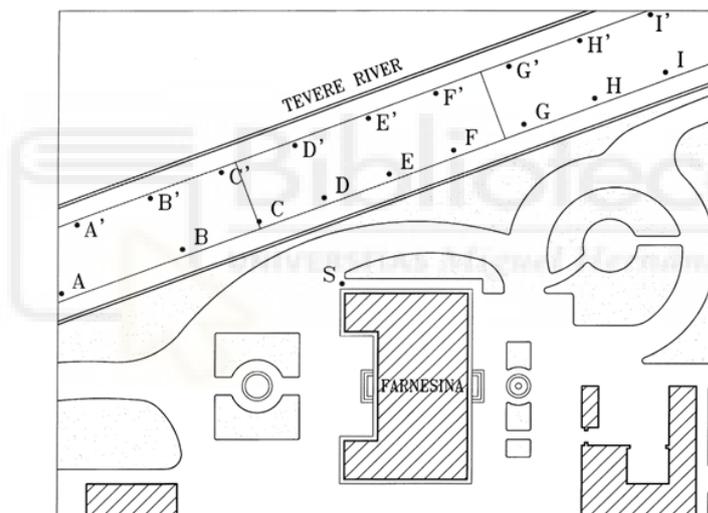


Figura 12: Disposición de los puntos de medida [10].

En la Figura número 13 se aprecia una sección de la calle colindante al edificio con cotas que muestran la distancia del tráfico a la edificación.

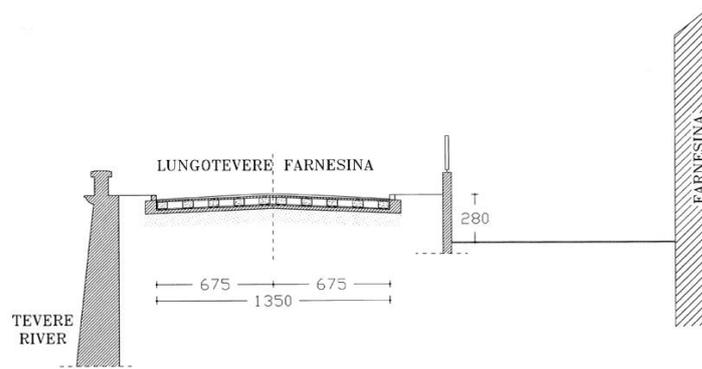


Figura 13: Sección de la calle colindante a Vila Farnesina [10].

Las gráficas de la Figura 14 muestran los valores recogidos tras el experimento, los cuales fueron de un máximo de aceleración debida al tráfico alrededor de 0,0027 g comprendido en un rango de frecuencias entre 16 y 32 Hz.

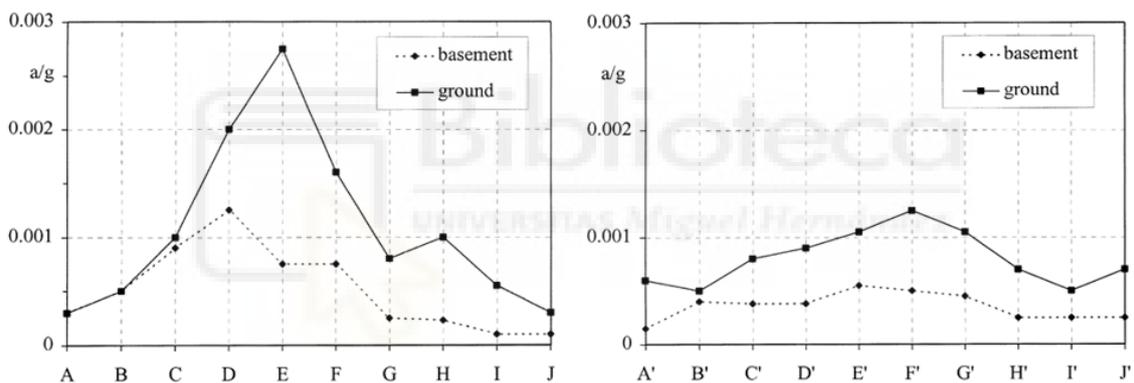


Figura 14: Valores de las medidas de vibraciones [10].

Para solucionar el problema se optó por una nueva estructura para la parte de calzada ubicada junto al edificio, hecha de una rejilla de concreto sostenida por almohadillas de goma, con dos juntas de unión típicas de los puentes al final de esta, logrando así reducir las vibraciones inducidas por el tráfico y protegiendo el edificio [10].

2.3. Cálculo de vibraciones producidas por el tráfico mediante métodos numéricos

Con la finalidad de obtener resultados próximos a la realidad de las vibraciones generadas por el tráfico rodado, gracias a los avances tecnológicos, se implementan diferentes técnicas matemáticas de procesamiento como los métodos numéricos [20].

A lo largo del tiempo se han desarrollado diferentes técnicas de modelado numérico como el modelado 2D y el modelado 3D.

Debido a la importancia de la amortiguación del suelo durante el movimiento del vehículo, los modelos bidimensionales pueden subestimar las características de propagación de las ondas en el medio, haciendo que los resultados de estas simulaciones disten de los resultados experimentales. Por otro lado, los modelos tridimensionales consumen un tiempo muy elevado de simulación, lo que puede hacerlos poco prácticos [18].

Para solventar estos inconvenientes, dado que, tanto el material como la geometría de la estructura de la vía y su base de apoyo pueden considerarse constantes en la dirección del movimiento del vehículo, se aplica la transformada de Fourier con respecto a la coordenada espacial en la dirección del movimiento de la carga a lo largo del eje X para simplificar el problema 3D y convertirlo en un modelo plano, es decir en un modelo 2,5D. De este se obtiene la exactitud de un modelo 3D ahorrando tiempo de procesamiento [23],[24].

Este enfoque matemático puede aplicarse tanto a vehículos terrestres como a ferroviarios. A continuación, se presentan dos modelos diferentes.

Por un lado, en la Figura 15 se muestra un modelo 2,5D de la vía de un tren en la cual toda la cara frontal está mallada en las direcciones formadas por el eje Z y el eje Y

sumado a dos fuerzas $q(t)$ desplazándose a lo largo del eje X simulando el movimiento del tren.

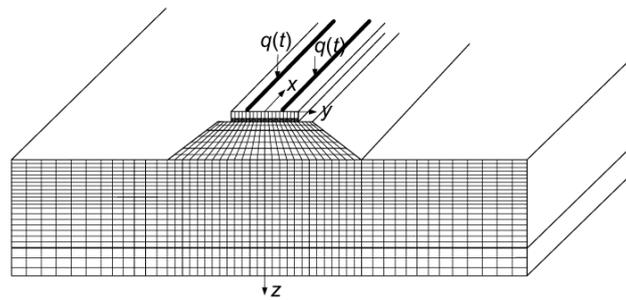


Figura 15: Modelo 2,5D de elementos finitos de trenes [23].

Por otro lado, en la Figura 16 se muestra un modelo 2,5D de una calzada en la cual toda la cara frontal está mallada en las direcciones formadas por el eje Z y el eje Y , sumado a dos fuerzas $q(t)$ desplazándose a lo largo del eje X , simulando el avance del vehículo.

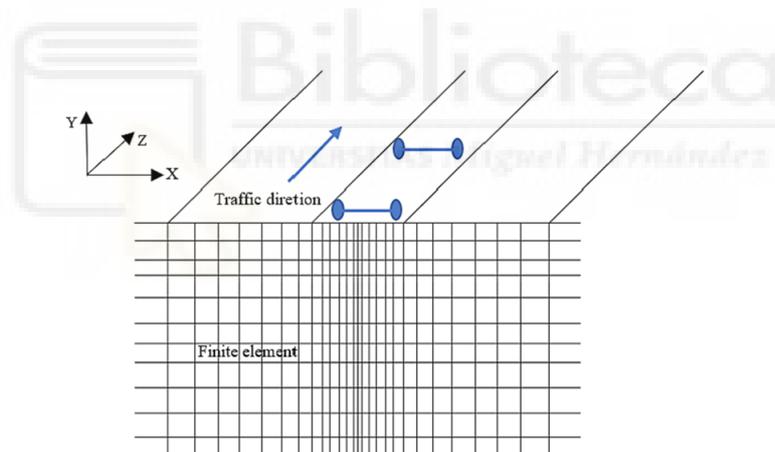


Figura 16: Modelo 2,5D de elementos finitos de vehículos [18].

3. OBJETIVOS

El objetivo principal de este estudio es desarrollar un modelo numérico parametrizado de la propagación de las vibraciones producidas por la circulación de un vehículo, mediante el software COMSOL Multiphysics.

Para validar el modelo se pretenden realizar medidas de vibraciones producidas por el paso de diferentes tipos de vehículos empleando un acelerómetro. Además, al tratarse de un proyecto de colaboración internacional también se emplearán los resultados de medidas de vibraciones obtenidos por D. Julián Ortiz Umaña en la ciudad de Montevideo, Uruguay para demostrar el correcto funcionamiento del modelo de COMSOL.

Mediante un script de Matlab se pueden procesar los datos obtenidos por el acelerómetro. De esta forma se busca obtener información sobre los principales factores que generan vibraciones y comprobar si el modelo es capaz de reflejarlo en sus resultados.

Para realizar todo lo anterior se pueden diferenciar varias fases, y para cada una se han fijado distintos objetivos parciales.

3.1 Objetivos específicos

Datos de partida:

- Conocer aspectos teóricos relacionados con las vibraciones, la física que las describe y formas de analizarlas.

Ensayos:

- Conocer la diferente instrumentación que se emplea en los ensayos, así como su disposición y montaje durante los mismos.
- Tomar muestras del paso de diferentes tipos de vehículos.

Creación del modelo:

- Aprender a utilizar el programa COMSOL Multiphysics.
- Crear una geometría parametrizada.
- Crear un mallado capaz de realizar el análisis de elementos finitos.
- Recopilar información mediante investigación en artículos científicos para configurar la fuerza que simula el paso de un vehículo de una manera adecuada.

Procesado:

- Crear un script de Matlab para la lectura de datos.
- Obtener de cada ensayo realizado, las zonas de interés con ventanas temporales de 4 segundos.
- Hallar la FFT de los archivos y obtener los picos de frecuencias máximas de cada muestra tomada.

Postprocesado:

- Búsqueda de similitudes entre las gráficas generadas por los ensayos experimentales y las gráficas generadas por la simulación.

Conclusiones:

- Demostrar que tipo de casos son los más desfavorables en cuanto a generación de vibraciones se refiere.

4. METODOLOGÍA DE ENSAYOS

En el presente apartado se exponen de una manera detallada todos los pasos seguidos durante las medidas. Se realiza una explicación de toda la instrumentación empleada, así como del modo en el que se llevan a cabo los ensayos.

4.1. Instrumentación

En este trabajo de final de grado son necesarias diferentes herramientas de instrumentación para realizar las medidas y el análisis de datos.

En primer lugar, se mencionan los instrumentos empleados, se muestra un esquema para representar de manera visual el flujo seguido por la señal medida, desde que se genera hasta que se analiza y posteriormente se profundiza en cada uno de los aparatos empleados para la medida.

Los instrumentos empleados en las medidas son:

- Acelerómetro.
- Tarjeta de adquisición de datos.
- Programa LabVIEW.

El proceso seguido desde la adquisición de las señales, hasta la digitalización de estas consta de tres etapas:

- Conversión de la magnitud física a una señal eléctrica mediante el sensor.
- Adaptación de la señal eléctrica para su lectura digital.
- Empleo de un sistema hardware de adquisición de datos, a través de un ordenador [25].

En la Figura 17 se muestra de manera esquemática los procesos aplicados a la señal para conseguir los resultados.

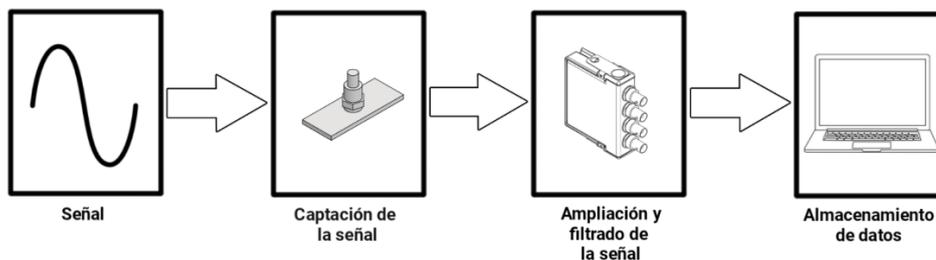


Figura 17: Esquema de adquisición de datos.

Una vez introducido el apartado se explica cada instrumento utilizado durante las medidas.

4.1.1. Acelerómetro

El acelerómetro es el instrumento empleado para captar las vibraciones producidas por los vehículos. A continuación, se exponen sus principales características:

El acelerómetro piezoeléctrico es uno de los sensores más usados y aceptados para la medida de vibraciones, debido a que puede ser empleado en un extendido rango de frecuencias, tiene una excelente linealidad y posee una alta sensibilidad. La calidad de este aparato está estrechamente ligada a su núcleo piezoeléctrico [26].

Estos equipos son los encargados de convertir una aceleración de gravedad o de movimiento, en una señal analógica proporcional a la fuerza aplicada sobre el sistema que se realiza la medida. Al estar registrando aceleraciones, el instrumento recoge los datos en sus respectivas unidades m/s^2 , acordes con el Sistema Internacional.

Como cualquier instrumento, en el mercado existen diversos tipos, modelos y fabricantes. Uno de los aspectos importantes a considerar es su diseño, ya que estos dispositivos son direccionales, es decir, detectan aceleración únicamente en el eje para el cual están diseñados. Cuando es necesario medir la aceleración en tres dimensiones, se emplean acelerómetros triaxiales, que cubren los ejes X, Y, y Z.

Además de la direccionalidad, existen dos tipos principales de acelerómetros: pasivos y activos. Los acelerómetros pasivos transmiten la carga generada por su elemento sensor, que puede ser un material piezoeléctrico. Dado que esta señal es muy débil, se requiere un amplificador para incrementarla. En cambio, los acelerómetros activos cuentan con circuitos internos que convierten directamente la carga generada en una señal de voltaje; sin embargo, estos requieren una fuente de corriente constante para alimentar el circuito interno [27].

En estos ensayos de vibraciones, se emplea un acelerómetro uniaxial como el que se muestra en la Figura 18. En concreto se trata del modelo PCB 601A01 de la empresa PCB Piezotronics.



Figura 18: Acelerómetro empleado en los ensayos.

Los sensores e instrumentos distribuidos por dicha empresa miden la vibración, la aceleración, el sonido, la presión, la fuerza, la deformación y se utilizan en la industria, así como en el campo de la investigación y el desarrollo.

El modelo empleado está diseñado especialmente para sistemas de monitorización continua en línea, mejorando así la seguridad cuando se instalan en lugares peligrosos o inaccesibles, además, su carcasa de acero inoxidable con cierre hermético y la electrónica aislada de la carcasa eliminan los problemas de ruido, haciéndolo un modelo ideal para su empleo en investigación [1].

La Figura 19 muestra la pieza encargada de hacer de anclaje entre el acelerómetro y el firme durante las medidas.



Figura 19: Anclaje del acelerómetro con el suelo.

En la Figura 20 se representa la vista isométrica del montaje del acelerómetro diseñado en CAD tal y como se ve en la realidad.

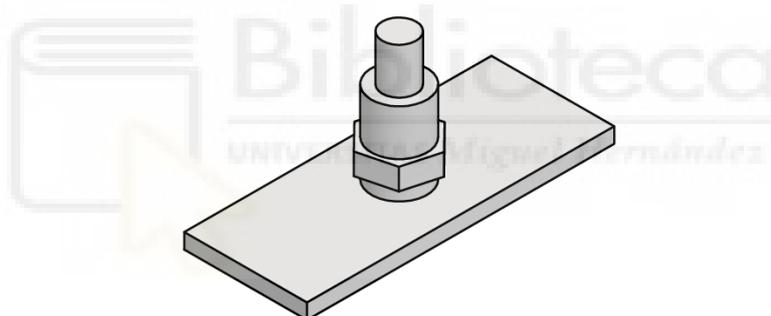


Figura 20: Vista isométrica del montaje del acelerómetro.

4.1.2. Adquisición y procesamiento de datos

Un sistema de adquisición de datos es un dispositivo encargado de recibir las señales de las interfaces físicas y digitalizarlas, pudiendo de este modo, ser leídas por un ordenador.

En la Figura 21 se muestra la tarjeta de adquisición de datos de la empresa 'National Instruments' empleada en el presente trabajo, diseñada especialmente para trabajar con un micrófono o con un acelerómetro.



Figura 21: Tarjeta de adquisición de datos NI.

Dicha tarjeta de adquisición de datos 'NI 9233' de National Instruments se encarga de capturar y digitalizar las señales analógicas que provienen de los sensores de vibración, en el caso del presente trabajo, el acelerómetro.

Las principales funciones de la tarjeta NI 9233 son:

1. Digitalización de la señal analógica:

- Convierte las señales analógicas en digitales con una alta precisión, permitiendo un muestreo rápido y preciso de las vibraciones. Esto es fundamental para obtener datos detallados sobre la frecuencia y amplitud de las vibraciones.

2. Filtrado:

- Cuenta con un filtro 'antialiasing', que ayuda a reducir el ruido y evita la distorsión de las señales, asegurando una medida limpia y precisa. Este filtro es particularmente útil en medidas de vibraciones de alta frecuencia.

3. Compatibilidad con acelerómetros IEPE:

- Compatible con sensores de tipo IEPE (Integrated Electronics Piezo-Electric),

como el acelerómetro empleado en las medidas. Ofrece una excitación de corriente constante necesaria para estos sensores, facilitando una configuración de adquisición simple y robusta.

4. Muestreo sincronizado de múltiples canales:

- Esta tarjeta permite la adquisición simultánea de cuatro canales de forma sincronizada. [28].



Figura 22: Adaptador tarjeta de adquisición-PC.

En la Figura 22 se muestra un adaptador para hacer uso de la tarjeta de adquisición de datos, puesto que el adaptador de la misma marca National Instruments aporta una conexión USB que permite conectar la tarjeta con el ordenador [28].

4.1.3. Análisis y almacenamiento de datos

Para analizar los datos recogidos por el acelerómetro se emplea un software llamado LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) de la empresa National Instruments.

LabVIEW es un entorno de desarrollo gráfico que permite controlar, visualizar y analizar datos en tiempo real de forma eficiente y personalizable [11].

Las dos funciones del programa usadas en el trabajo son las siguientes:

1. Adquisición de datos:

- LabVIEW permite diseñar interfaces gráficas (paneles de control) para interactuar con el equipo de medida. Además, se sincroniza la tarjeta de adquisición con el sensor, garantizando que los datos capturados por el acelerómetro uniaxial se transfieren al ordenador en tiempo real.

2. Captura y almacenamiento de señales:

- LabVIEW recibe las señales de vibración digitalizadas por la tarjeta de adquisición y las almacena en el ordenador para su posterior análisis. Puede guardar los datos en archivos, bases de datos o formatos personalizados, en este trabajo se guardan archivos con la extensión .xlsx para luego ser leídos por un script de Matlab.

La Figura 23 muestra el diagrama de bloques empleado en el entorno de LabVIEW para lograr una correcta adquisición de datos.

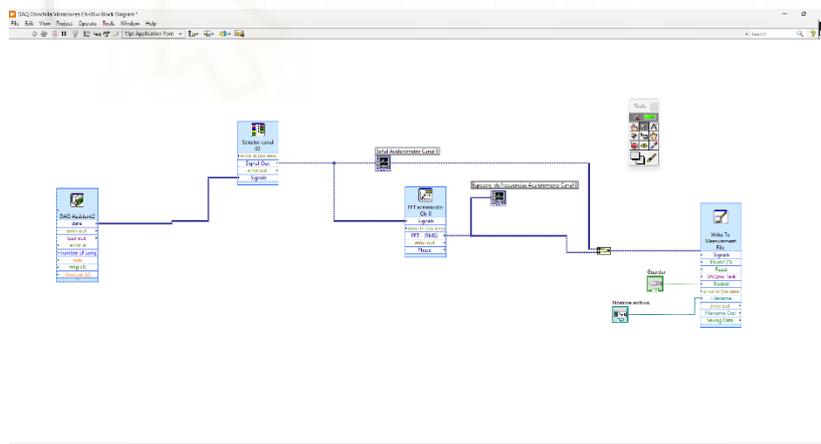


Figura 23: Esquema del programa LabView para procesar datos.

Es menester mencionar que el software de LabVIEW también puede mostrar los resultados de las medidas en tiempo real, pero en este trabajo se opta por usar MatLab, en los próximos capítulos se muestra el script junto con los resultados de las medidas.

4.2. Ensayos

Los ensayos realizados miden las vibraciones generadas por un vehículo, ya sea un turismo, autobús o camión a su paso por una calzada urbana gracias a un acelerómetro uniaxial.

Se realizan medidas siguiendo el mismo procedimiento en dos puntos diferentes de la ciudad de Elche. Primero, se detalla el método empleado y a continuación, se destacan las particularidades específicas de cada punto de medida.

4.2.1. Metodología para la medida de vibraciones

Para el análisis de vibraciones en este trabajo de fin de grado, como ya se ha mencionado previamente, se utiliza un acelerómetro uniaxial conectado a una tarjeta de adquisición de datos de la marca National Instruments (NI) y controlado mediante un diagrama de bloques preconfigurado en el software LabVIEW. El objetivo es registrar las vibraciones generadas por el paso de vehículos en las dos zonas que se indican a continuación.

Antes de comenzar las medidas, se calibra el acelerómetro utilizando un calibrador de la misma marca.

La Figura 24 muestra el calibrador empleado para comprobar que el acelerómetro funciona correctamente.



Figura 24: Calibrador del acelerómetro.

En la Figura 25 se muestra el entorno de LabVIEW utilizado para la calibración del acelerómetro. En la gráfica superior, se observa la señal de vibración captada por el acelerómetro durante el proceso de calibración, mientras que en la gráfica inferior se representa el espectro de frecuencias correspondiente. La señal de amplitud y el espectro permiten verificar que el acelerómetro responde correctamente antes de llevar a cabo las medidas, asegurando la precisión en la toma de datos.

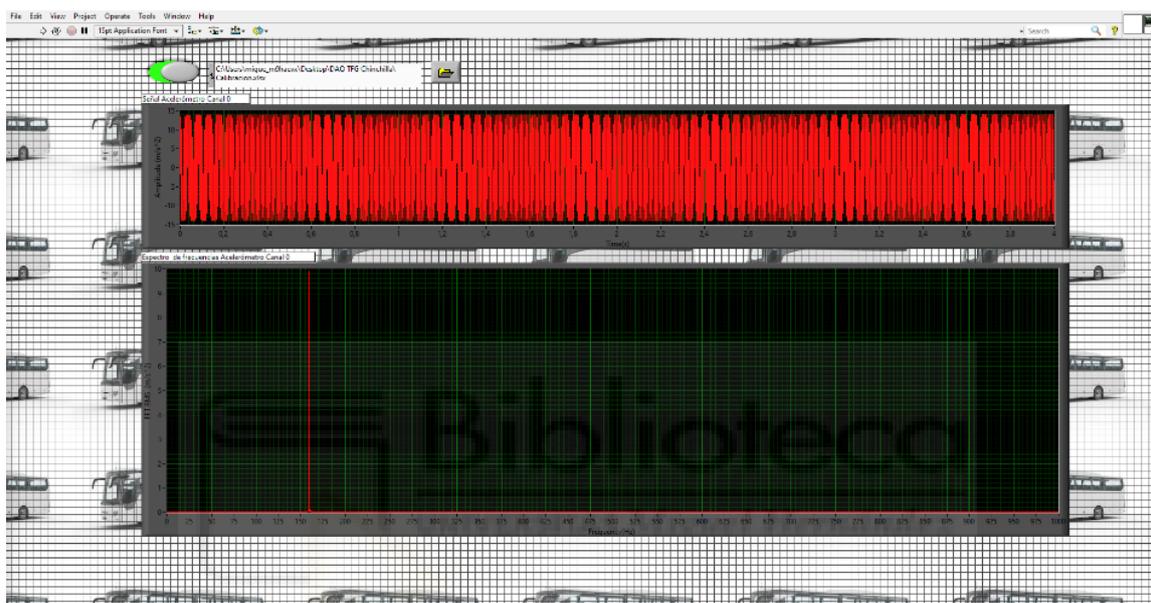


Figura 25: Interfaz usada durante la calibración del acelerómetro.

Una vez calibrado, la configuración experimental se realiza de la siguiente manera:

Para asegurar un buen acoplamiento con la superficie del suelo, el sensor se fija a la placa metálica mediante un sistema de imantación y posteriormente, se adhiere al suelo utilizando cinta de doble cara, lo que garantiza estabilidad durante las medidas.

El acelerómetro se coloca a una distancia distinta en cada punto de medida la cual se especifica en los siguientes apartados.

Acto seguido, se establece una ventana temporal de 8 segundos para la adquisición de datos. Esto permite ajustar el paso del vehículo de manera que los eventos de interés queden registrados de manera centrada en la ventana temporal definida.

Antes de proceder con las medidas de vehículos en movimiento, se realizan tres medidas iniciales en condiciones de ausencia de tráfico para registrar el nivel de ruido de fondo en cada punto y verificar el correcto funcionamiento del acelerómetro. De esta manera se tiene certeza de que los resultados no están contaminados por ningún tipo de frecuencia ajena al estudio.

Una vez obtenidos los resultados, el programa LabVIEW los almacena en forma de archivos de extensión .xlsx, para posteriormente ser leídos y graficados mediante un script de Matlab.

4.2.2. Punto de medida 1

El primer punto en el que se han realizado las medidas es el Paseo de la Estación, situado al sureste del centro histórico de la ciudad. La Figura 26 muestra el plano de situación del primer punto de medida.



Figura 26: Plano de situación Avenida del Paseo de la Estación.

Se trata de una calle con una calzada de doble sentido y un amplio espacio peatonal en ambos lados de esta.

El set up del equipo queda montado en el primer punto de medida tal y como se muestra en la Figura 27.



Figura 27: Montaje del equipo en el punto 1.

Una vez el equipo está listo, con el acelerómetro colocado en su posición, se da comienzo a la recogida de datos. Cabe destacar que durante las medidas en este punto, el acelerómetro se encuentra colocado a una distancia perpendicular de 7,5 m del eje central del carril más cercano, tal y como se ve en la Figura 28.

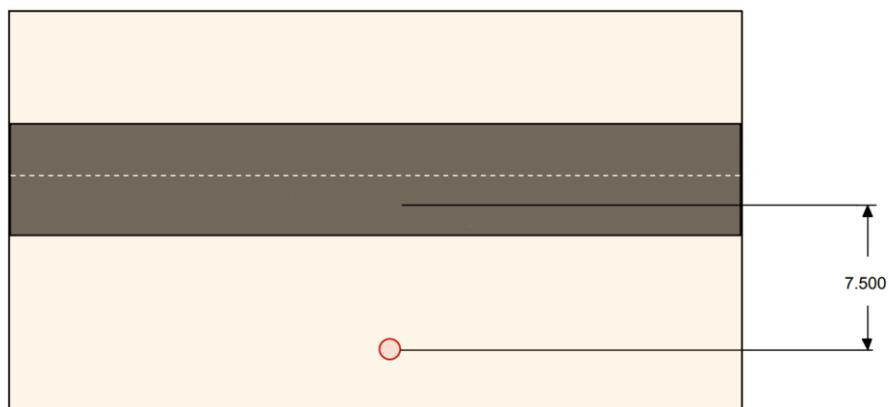


Figura 28: Distancia del centro de la vía al acelerómetro en el punto 1.

Una vez está todo colocado, solo queda darle al 'Play' cuando un vehículo se aproxima y medir las vibraciones que genera. Los resultados de las medidas y de las simulaciones se muestran en los siguientes apartados.

4.2.3. Punto de medida 2

El segundo punto en el que se han realizado las medidas es la Avenida de Jubalcoy, situado al noreste de la ciudad de Elche. En la Figura 29 se muestra el plano de situación del segundo punto de medida.



Figura 29: Plano de situación de la Avenida Jubalcoy.

Se trata de una avenida con dos carriles de circulación para cada sentido, separados por una mediana y con una acera peatonal a cada lado de los carriles. El equipo, en este lugar queda montado como se aprecia en la Figura 30.



Figura 30: Montaje del equipo en el punto 2.

El siguiente paso, al igual que en las primeras medidas, es colocar el acelerómetro en el suelo quedando fijada su posición. Durante las medidas en este punto, el acelerómetro se encuentra colocado a una distancia perpendicular de 5,5 m del eje central del carril más cercano, tal y como se ve en el plano de la Figura 31.

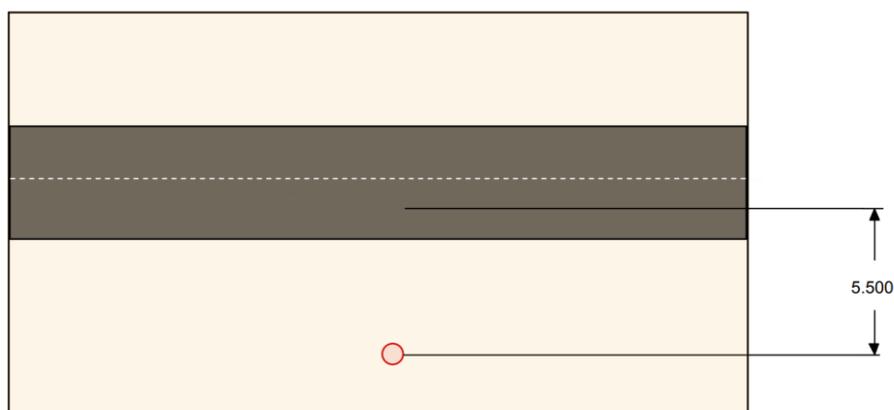


Figura 31: Distancia del centro de la vía al acelerómetro en el punto 2.

De igual modo que en el primer punto de medida, una vez se tiene todo colocado, solo queda darle al 'Play' cuando un vehículo se aproxima y medir las vibraciones que genera. Los resultados de las medidas y de las simulaciones se muestran en los siguientes apartados.

La Figura 32 muestra el paso de un autobús en el momento de las medidas.



Figura 32: Autobús pasando por la zona de medida.

5. CONFIGURACIÓN DEL MODELO

5.1 Inicio del programa.

A continuación, se realiza una explicación del programa empleado durante el trabajo, COMSOL Multiphysics.

Acto seguido, se detalla cada paso seguido dentro del programa para la configuración del modelo desarrollado, facilitando al lector seguir todo el proyecto del mejor modo posible.

En primer lugar, es importante destacar que COMSOL Multiphysics es un software de simulación que permite modelar problemas físicos en diversos ámbitos de la ciencia y la ingeniería. Este software abarca una amplia gama de áreas, que incluyen la mecánica de fluidos, la transferencia de calor, el cálculo de tensiones y deformaciones, y en el caso de este proyecto en particular, el análisis de vibraciones.

Una vez se inicia un proyecto en COMSOL, debe configurarse para que se adapte del mejor modo al estudio que se quiere realizar. En el caso de este trabajo, se escoge una dimensión 3D y dos estudios, uno estacionario y otro transitorio.

Al tratarse de un estudio de vibraciones, para desplegar los estudios estacionario y transitorio debe seleccionarse estudio de 'Solid Mechanics'.

En la Figura 33 se muestra de una forma esquemática el flujo de operaciones seguido para configurar la primera parte del estudio.

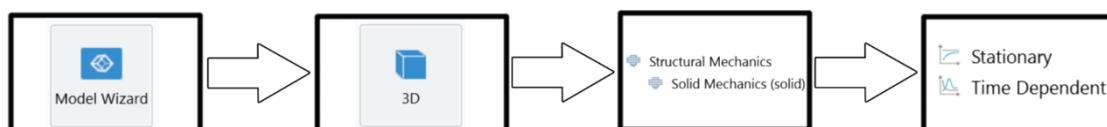


Figura 33: Diagrama de flujo para iniciar los estudios.

Una vez seleccionadas estas opciones, el programa está listo para comenzar a crear el modelo.

El capítulo se divide de forma que se pueda mostrar de un modo claro todos los apartados seguidos, tales como:

- Parametrización.
- Creación de la geometría.
- Definir los materiales.
- Mallado de la geometría.
- Fuerzas que actúa sobre la geometría.

5.2 Parametrización

Parametrizar es crear un modelo geométrico utilizando diferentes variables o parámetros que controlan y rigen las dimensiones, formas y geometrías.

Para facilitar la construcción del modelo, todas las dimensiones están parametrizadas y a su vez todos los parámetros se encuentran relacionados entre sí mediante ecuaciones sencillas como pueden ser sumas, restas o multiplicaciones. De este modo, la variación de un parámetro modifica automáticamente todos aquellos que están relacionados con dichas ecuaciones.

La finalidad de realizar un modelo parametrizado es poder adaptar la geometría a cualquier proyecto deseado en el menor tiempo y con el menor esfuerzo posible. Esto hace que no sea necesario iniciar un trabajo desde cero y poder reutilizar el modelo existente para la elaboración de uno nuevo.

Para añadir un nuevo parámetro o consultar los que ya están creados, en la ventana 'Model Builder' se encuentra la pestaña 'Parameters'.

De este modo en la ventana 'Settings' se despliega la tabla con todos los parámetros empleados en el modelo, tal y como se aprecia en la Tabla 2.

Nombre	Expresión	Valor	Descripción
L	$8 \cdot \text{Bat}$	48 m	Longitud.
Ar	0,3[m]	0,3 m	Ancho ruedas.
Av	2,2[m]	2,2 m	Ancho vías.
dMedida	$\text{Ac}/2 + \text{Daceler} - \text{Abor}/2$	5,9 m	Distancia al centro del carril del acelerómetro.
Ac	7[m]	7 m	Ancho de la calzada.
Hc	0,3[m]	0,3 m	Altura de cada capa de la Carretera.
Ha	$3 \cdot \text{Hc}$	0,9 m	Altura de la acera.
B	0,25[m]	0,25 m	Altura del bordillo.
Lc	0,2[m]	0,2 m	Lado del cubo de aluminio.
Aa2	7[m]	7 m	Ancho de la acera 2.
At	$\text{Ac} + \text{Aa2}$	14 m	Ancho total.
Hb1	2[m]	2 m	Altura de la capa base 1.
Hb2	5[m]	5 m	Altura de la capa base 2.
D	0,05[m]	0,05 m	Desfase entre capas.
PML	2[m]	2 m	Espesor de las PML.
Hsub	0,1[m]	0,1 m	Subcapas del asfalto.
Lr	0,3[m]	0,3 m	Largo huella de contacto.
Velocidad	30[km/h]	8.33 m/s	Velocidad de circulación.
Bat	6[m]	6 mAh	Batalla de las ruedas.
Ah	$\text{Ar} \cdot \text{Lr}$	0,09 m ²	Área huella de contacto.
IntC	Pr/Ah	4.5833E5 N/m ²	
Pb	$10 \cdot 16500[\text{N}]$	1,65E5 N	Peso del autobús.
Pr	$\text{Pb}/4$	41250 N	Peso que cae en cada rueda.
t	0	0	
Daceler	2,5[m]	2,5 m	Distancia del acelerómetro al borde de la calzada.
Offset	1[m]	1 m	Desfase cuando la calzada es muy amplia y el vehículo circula por un lateral y no por el centro.

tf	4[s]	4 s	Tiempo final de simulación.
FS	2*Fmax	600 Hz	Frecuencia de muestreo.
Fmax	300[Hz]	300 Hz	Frecuencia máxima que queremos observar.
Abor	0,2[m]	0,2 m	Ancho del bordillo.
Pini	$(\text{Velocidad} * \text{tf}) / 2 - \text{Bat} / 2$	1,667 m	Punto en el que empieza a correr la fuerza respecto el centro de la carretera.
m	Pb/g	16820 kg	Masa del autobús.
g	9,81[m/s ²]	9,81 m/s ²	Gravedad.

Tabla 2: Parámetros empleados en el modelo de COMSOL.

En la Figura 34 se presenta de forma clara y visual la relación de cada parámetro con su correspondiente parte de la geometría.

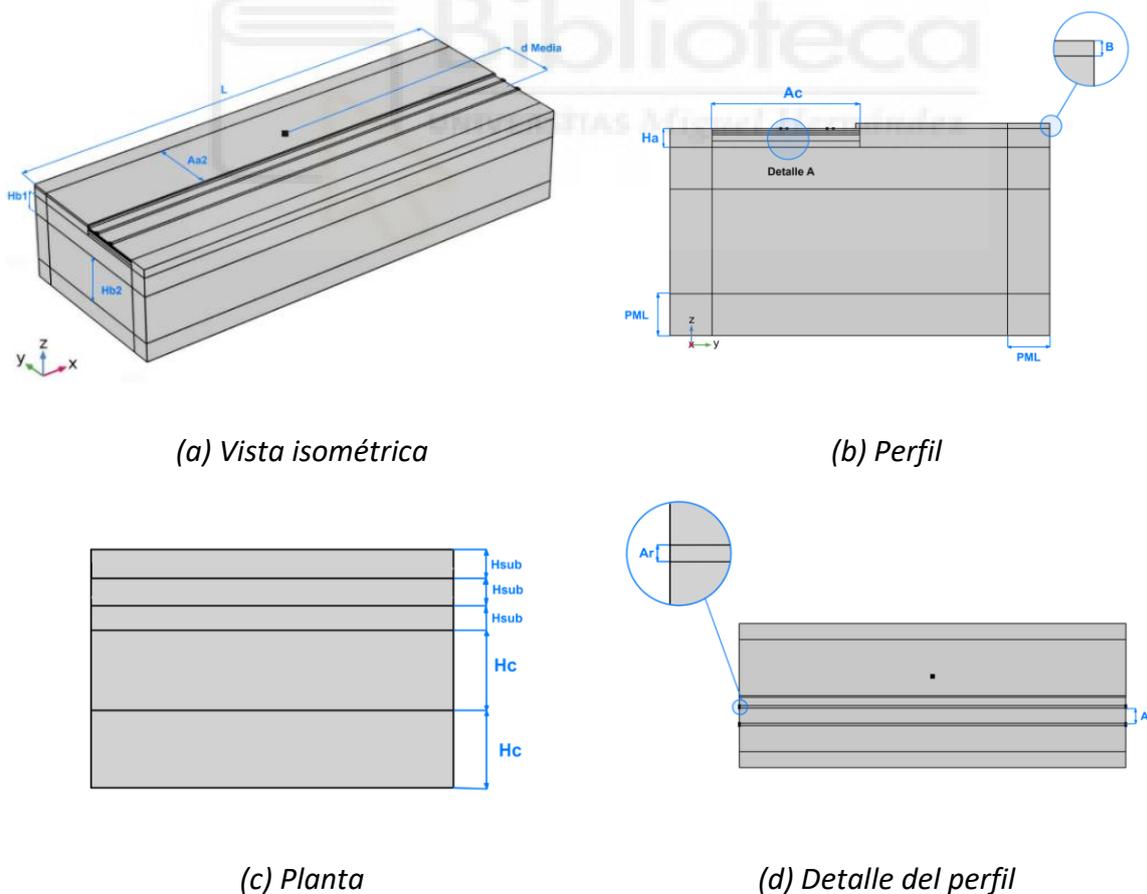


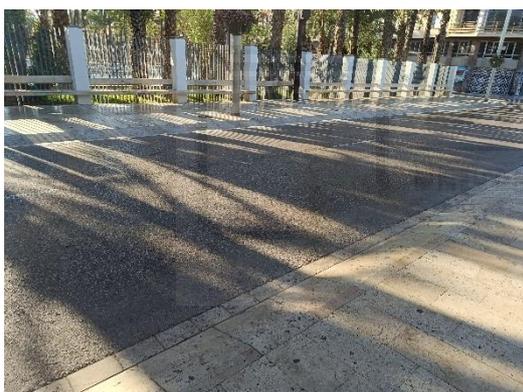
Figura 34: Geometría parametrizada del modelo.

5.3 Creación de la geometría

El modelo se diseña considerando la geometría de los dos lugares en los que se han llevado a cabo las medidas experimentales con el acelerómetro. Como ya se ha introducido, uno de ellos es el Paseo de la Estación y el otro la Avenida de Jubalcoy, ambos ubicados en la localidad de Elche.

Para reducir el tiempo de simulación, se ha simplificado la geometría eliminando aquellas zonas irrelevantes en el análisis de vibraciones, haciendo posible de este modo, utilizar un mismo modelo para los dos puntos de medida.

Se puede apreciar en la Figura 35 como ambas geometrías constan de una calzada situada justo al lado de una zona peatonal.



(a) Paseo de la Estación



(b) Avenida de Jubalcoy

Figura 35: Geometrías de referencia para crear el modelo.

Para facilitar el procesamiento de datos a la hora de la simulación, se han eliminado algunas zonas como aceras o carriles irrelevantes en el estudio.

A continuación, se muestra cómo realizar la geometría en el programa, explicando en primer lugar como realizar cada función básica por separado y acto seguido, la secuencia de operaciones seguida en el proyecto:

Las funciones empleadas en la creación de la geometría son:

- Block.
- Extrusión de polígonos.
- Secuencia de operaciones.

5.3.1. Función 'Block'

Se trata de una geometría formada principalmente por rectángulos, por ello se selecciona la función 'block'.

Para indicar las dimensiones del bloque debe completarse el panel de 'Size and Shape' con valores previamente parametrizados.

Una vez creado el bloque es importante colocarlo en la posición adecuada, para ello se rellena el panel 'Position', al igual que en el panel de 'Size and Shape', se emplean valores parametrizados. En la Figura 36 queda representada la secuencia de operaciones.

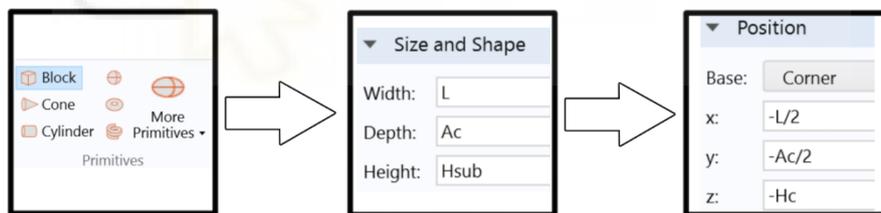


Figura 36: Diagrama de flujo para crear un bloque.

5.3.2. Extrusión de polígonos

Esta función se emplea para geometrías más complejas que con la función 'Block' no quedan bien definidas.

El primer paso para formar un polígono es crear el plano sobre el que se va a dibujar. Para ello dentro del apartado 'Geometry' en la parte superior, se selecciona la opción 'Work plane'.

Una vez ubicado el plano, se crea el polígono, para ello dentro de 'Plane geometry' en la parte superior de la pantalla se selecciona la opción 'polygon'.

Una vez creado el polígono, se define rellenando una tabla de valores siendo estos valores las coordenadas de cada vértice. Esta secuencia de operaciones queda recogida en la Figura 37.

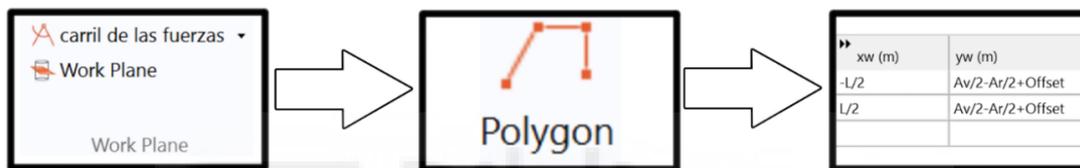


Figura 37: Diagrama de flujo para crear un polígono.

Para extruir el polígono creado, en la parte superior de la pantalla, se escoge la opción 'Extrude'.

Acto seguido en el apartado 'work plane' selecciona el plano que contiene el polígono y se indica la distancia de extrusión en la tabla 'Distance' tal y como se muestra en la Figura 38.

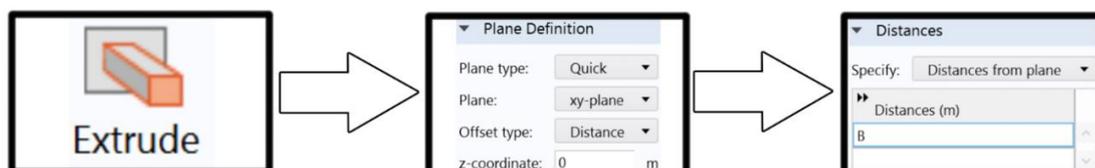


Figura 38: Diagrama de flujo de la función extrusión.

Para organizar todos los pasos que se han seguido se crea un grupo con el nombre deseado dejando más organizado el proceso de la creación de la geometría. Esto queda recogido en la Figura 39.

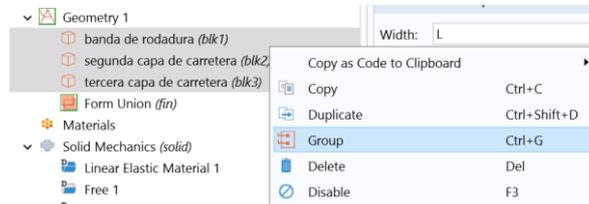


Figura 39: Uso de la función 'Group'.

5.3.3. Secuencia de operaciones

Una vez indicada la forma de ejecutar cada parte por separado, en este apartado se explica la secuencia a seguir para crea la geometría usada en este trabajo en concreto.

Se divide la geometría en 3 grupos

- Carretera.
- Aceras y bases.
- PML.

En la Figura 40 quedan recogidos los tres grupos diferentes de la geometría.

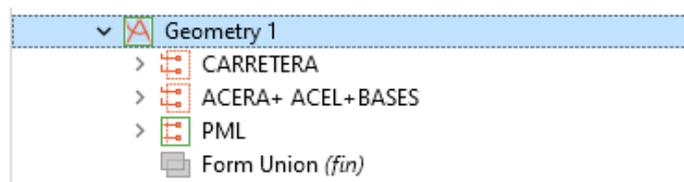


Figura 40: Separación de la geometría en grupos.

5.3.3.1 Creación de la carretera

Para la creación de la carretera se emplea información recogida en la normativa de firmes de la Comunidad Valenciana [29]. En primer lugar, se menciona toda la normativa consultada y simultáneamente se indica cómo realizarla con COMSOL.

Los factores determinantes para el dimensionamiento del firme de la calzada son:

- Categoría de tráfico pesado.
- Zona climática.
- Zonas pluviométricas.

Categoría del tráfico pesado:

Los tramos de carretera en los que se realiza el estudio están dentro del casco urbano de Elche. Por esta calzada no suele circular tráfico pesado, a excepción de los autobuses y camiones ligeros que ocasionalmente circulan.

Por lo tanto, se prevé una variedad de paso de vehículos pesados escasa, inferior a 100 veh. pesados/día.

Se dimensiona el firme para una categoría de tráfico pesado T32 correspondiente a una IMDp entre 50 y 100 de acuerdo con [29]. La Tabla 3 muestra las diferentes categorías de tráfico pesado.

Categoría de tráfico pesado	T31	T32	T41	T42
IMDp (Vehículos pesados/día)	≤200	≤100	≤50	≥100
IMDp (Vehículos pesados/día)	≥100	≥50	≥25	≥100

Tabla 3: Categoría de tráfico pesado [29].

Zona climática:

Las condiciones climáticas de la zona donde se ubica la carretera tienen influencia sobre el dimensionamiento del firme. La Comunidad Valenciana, a efectos de dimensionamiento del firme, queda diferenciada en 4 zonas climáticas dependiendo de la temperatura máxima y mínima de cada zona tal y como queda recogido en la Tabla 4.

Zona térmica	ZT1	ZT2	ZT3	ZT4
Tmáx	≤28	≥38 Y ≤32	≥28 Y ≤32	≥32
Tmin	≤-6	≤-6	≥-6	≥32

Tabla 4: Clasificación de las zonas térmicas [29].

Para la determinación de la zona climática han de consultarse los datos de la estación meteorológica representativa más cercana, en este caso es la instalada en el aeropuerto de Elche-Alicante la cual indica una temperatura máxima de 34º y una mínima de 3º haciendo así que la zona se catalogue como ZT4.

Zona pluviométrica:

Las precipitaciones en la zona donde se ubica la carretera tienen influencia sobre el dimensionamiento del firme. La Comunidad Valenciana, a efectos de dimensionamiento del firme, queda diferenciada en 2 zonas pluviométricas dependiendo de las precipitaciones como muestra la Tabla 5.

Zona Pluviométrica	ZP1	ZP2
<i>P</i>	<600	≥600

Tabla 5: Clasificación de las zonas pluviométricas [29].

Siendo *P* la precipitación media anual, en mm, para un periodo de medida continuado de 30 años.

Para la determinación de la zona pluviométrica, han de consultarse los datos de la estación meteorológica representativa más cercana, en este caso es la instalada en el aeropuerto de Elche-Alicante la cual da unas precipitaciones inferiores a 600 mm, haciendo así que la zona se catalogue como ZP1.

Una vez identificados estos datos, se pueden dimensionar las secciones del firme que se crean en el modelo de COMSOL, las cuales se diferencian en:

- Cimiento del firme.
- Capa intermedia.
- Capa asfáltica.

Cimiento del firme:

Se denomina explanada a la superficie donde apoya el firme. Por tanto, la explanada es la parte superior del cimiento del firme. Normalmente este cimiento lo forma la propia roca que hay en la zona, una aportación de tierra o un suelo estabilizado in-situ.

Las explanadas se diferencian en función de los valores de referencia de los módulos elásticos de superficie y sus coeficientes de Poisson. La Tabla 6 recoge los datos técnicos de cada tipo de explanada.

Tipo de explanada	$E_{0,ck}$	ν
E1	≥ 100 MPa	0,40
E2	≥ 140 MPa	0,30
E3	≥ 255 MPa	0,35
E4	≥ 440 MPa	0,40

Tabla 6: Clasificación de los tipos de explanada según su coeficiente de Poisson y su módulo elástico [29].

Para realizar el modelo en COMSOL, se considera una explanada del tipo E2 con $E_{0,ck} \geq 140$ MPa y $\nu = 0,3$ y con un espesor de 30 cm creada mediante la función 'block'.

Capa intermedia:

Esta capa es la encargada de ligar la explanada con la capa asfáltica, para ser fieles a la realidad, se escoge una capa de zahorra artificial de 30 cm con las características que se especifican en la imagen extraída de la Norma de Firmes de la Comunidad Valenciana [29], en el software COMSOL, creada con la función 'block'. La Tabla 7 muestra las características mecánicas de materiales no tratados.

Categoría	Tipo	E_{min}	E_{max}	E_{med}	ν	a	b
Zahorra artificial	ZA	80 MPa	600 MPa	$0,206 \cdot h10^{0,45} \cdot E_s$	0,35	$1,58 \cdot 10^2$	0,25
Macizo Semi-indefinido	E1	35 MPa	65 MPa	50	0,40	$1,58 \cdot 10^2$	0,25
	E2	70 MPa	105 MPa	85	0,40	$1,58 \cdot 10^2$	0,25
	E3	155 MPa	280 MPa	215	0,35	$1,58 \cdot 10^2$	0,25
Suelo natural	-	30 MPa	250 MPa	10·CBR	0,40	$1,58 \cdot 10^2$	0,25

Tabla 7: Características mecánicas de materiales no tratados [29].

Capa asfáltica:

Esta capa está en contacto con las ruedas de los vehículos. Para ser más precisos, esta capa se divide en 3 subcapas: rodadura, capa intermedia y la base, formadas por los materiales que se especifican en la imagen extraída de la norma de Firmes.

- Rodadura: 10cm de BBTM 8 B M.
- Intermedia: 10 cm de AC 22 bin D.
- Base: 10 cm de AC 32 base G.

Tipo	$E_{min}[MPa]$	$E_{max}[MPa]$	$E_{med}[MPa]$	ν	a	b
BBTM 11 B M	2500	3250	3000	0,35	-	-
BBTM 8 B M	2500	3250	3000	0,35	-	-
BBTM 11 A F	4000	5250	5000	0,35	-	-
BBTM 8 A F	4000	5250	5000	0,35	-	-
PA 11	2500	3250	3000	0,35	-	-
AC 16 surf D	3500	9500	7000	0,33	$6,92 \cdot 10^{-3}$	0,2743
AC 22 surf D	3500	9500	7000	0,33	$6,92 \cdot 10^{-3}$	0,2743
AC 22 bin D	3500	9500	7000	0,33	$6,92 \cdot 10^{-3}$	0,2743
AC 16 surf S	3500	9500	7000	0,33	$6,92 \cdot 10^{-3}$	0,2743
AC 22 surf S	3500	9500	7000	0,33	$6,92 \cdot 10^{-3}$	0,2743
AC 22 bin S	3500	9500	7000	0,33	$6,92 \cdot 10^{-3}$	0,2743
AC 32 bin S	3500	9500	7000	0,33	$6,92 \cdot 10^{-3}$	0,2743
AC 22 bin G	2500	7000	5000	0,33	$6,44 \cdot 10^{-3}$	0,2743

AC 32 bin G	2500	7000	5000	0,33	$6,44 \cdot 10^{-3}$	0,2743
AC 22 base G	2500	7000	5000	0,33	$6,44 \cdot 10^{-3}$	0,2743
AC 32 base G	2500	7000	5000	0,33	$6,44 \cdot 10^{-3}$	0,2743
AC 22 bin 15/25 AM	10000	14000	11000	0,30	$6,6 \cdot 10^{-3}$	0,2743
AC 22 base 15/25 AM	10000	14000	11000	0,30	$6,6 \cdot 10^{-3}$	0,2743

Tabla 8: Características mecánicas de mezclas bituminosas [29].

Las capas que forman la capa asfáltica se crean también con la función ‘block’ quedando así una calzada formada por tres capas diferenciadas como muestra la Figura 41.



Figura 41: Geometría de la calzada.

Por último, los dos carriles por los que circulan las fuerzas se realizan con la función polígono 2D ubicándolos en el centro del carril simulando la trayectoria que siguen las ruedas de un vehículo.

5.3.3.2. Aceras y Bases

Para las bases de la calzada, con la función ‘polygon’ se crea un rectángulo que abarque toda la base del modelo para extruirlo haciendo que quede toda la geometría con una base uniforme tal y como muestra la Figura 42 (a). Por otro lado, para crear la geometría respectiva a la acera se emplea la función ‘block’ y se coloca adosado a la carretera ya existente tal y como muestra la Figura 42 (b).

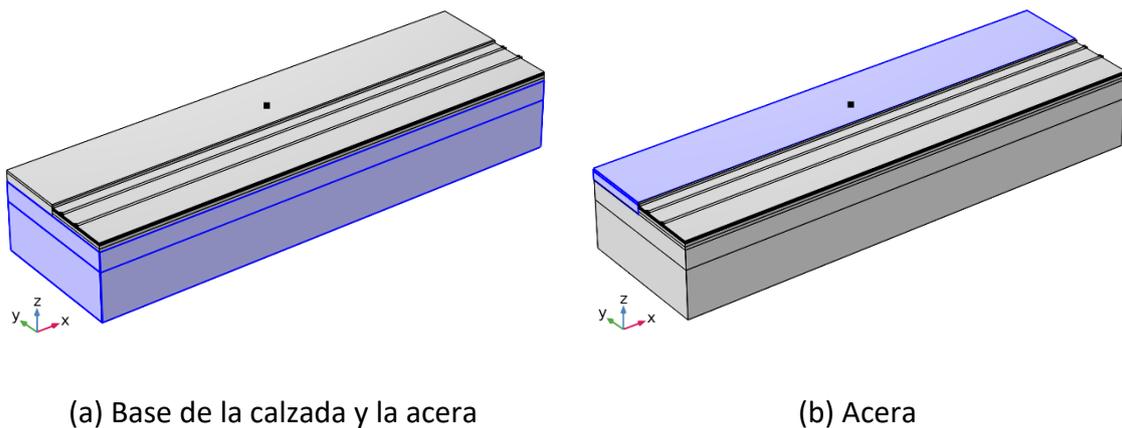


Figura 42: Geometría de la calzada con acera y sus bases.

5.3.3.3. PML (Perfect Matched Layers)

La capa perfectamente adaptada (PML) es una condición que se agrega a un modelo acústico o vibratorio para imitar un dominio infinito y no reflectante.

Establece un dominio perfectamente absorbente como una alternativa a las condiciones de contorno no reflectantes, además las PML funcionan con todo tipo de ondas, no solo ondas planas.

En el dominio de la frecuencia, la PML impone una transformación de coordenadas de valor complejo al dominio seleccionado que lo hace efectivamente absorbente a una impedancia de onda mantenida y por lo tanto, elimina las reflexiones en la interfaz. En el dominio del tiempo, se resuelven ecuaciones adicionales en la PML para las ecuaciones de la transformada de Laplace inversa [III].

Para crearlas en el modelo, primero se crea su geometría y luego se le da la propiedad de PML.

La geometría de la PML se crea con un polígono rectangular y se extruye quedando tal y como se ve en la Figura 43.

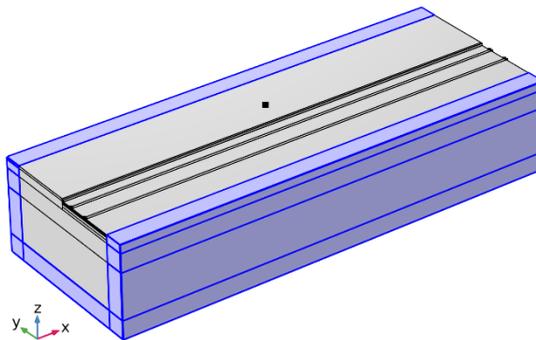


Figura 43: Geometría completa con PML.

El programa cuenta con la función de PML, para añadirla a las capas de interés, se debe seguir el diagrama de flujo mostrado en la Figura 44.

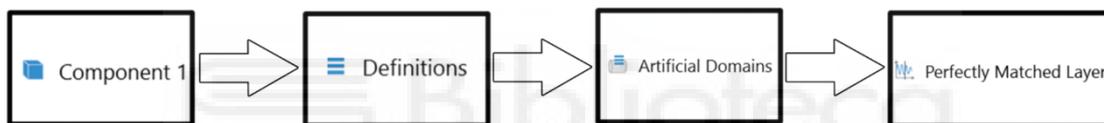


Figura 44: Diagrama de flujo para configurar las PML.

Por último, debe indicarse a que capas le corresponde la propiedad de PML, deben seleccionarse en la ventana de 'settings' como muestra la Figura 45.

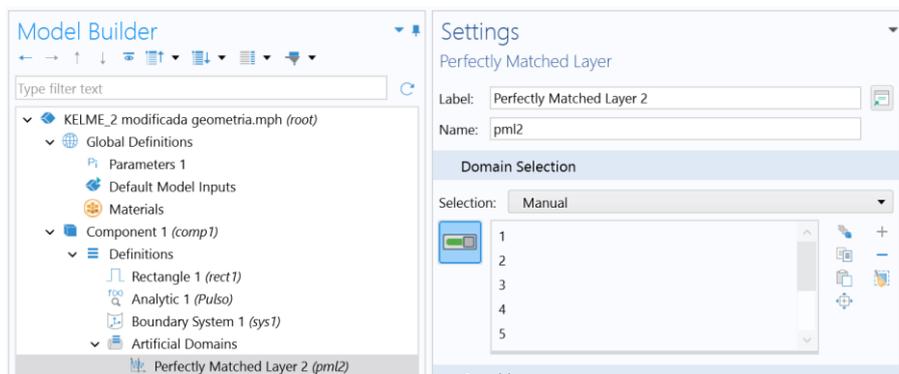


Figura 45: Selección de las capas con la propiedad de PML.

5.4. Elección de materiales

Como ya se ha introducido en el apartado 5.3.3.1, en la Comunidad Valenciana, toda la información técnica sobre materiales empleados en la construcción de carreteras queda recogida en el documento de firmes de la comunidad, más concretamente, en el apartado 6.1 de la misma [29].

Para analizar el material que compone cada capa, se realiza mediante una técnica llamada calicata. Dicha técnica consta de una excavación en el terreno de entre 1,5 y 3 metros de profundidad, haciendo posible de este modo identificar la composición, la textura, la condición y sobre todo, la profundidad a la que se halla cada material [29].

No se ha optado de los medios suficientes para realizar una calicata, con la finalidad de obtener unos resultados acordes a la realidad se emplean materiales con propiedades obtenidas de la base de datos de los modelos realizados con anterioridad en el LIAV (Laboratorio de Ingeniería Acústica y Vibraciones) de la Universidad Miguel Hernández.

El diagrama de flujo adjunto en la Figura 46 muestra la forma de añadir un material al modelo.



Figura 46: Diagrama de flujo para añadir un material al modelo.

Una vez seleccionado el material que se desea añadir, se indica a que parte de la geometría se le quiere dar esa propiedad como se muestra en color verde en la Figura 47.

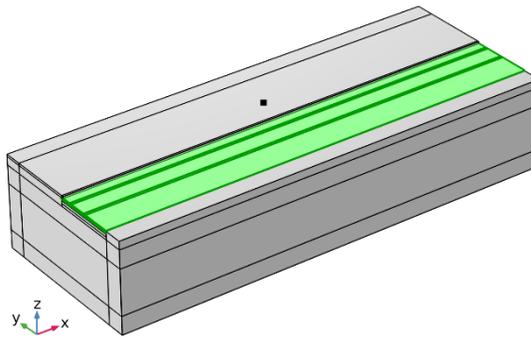


Figura 47: Zona de la geometría seleccionada para añadir el material.

En caso de que el material no esté en la librería de COMSOL, se le puede atribuir las propiedades físicas necesarias para el estudio. En el presente trabajo al tratarse de materiales muy específicos se han seleccionado manualmente los valores de módulo de Young, densidad y coeficiente de Poisson necesarios para cada parte de la geometría. En la Figura 48 se indican las diferentes partes de la geometría.

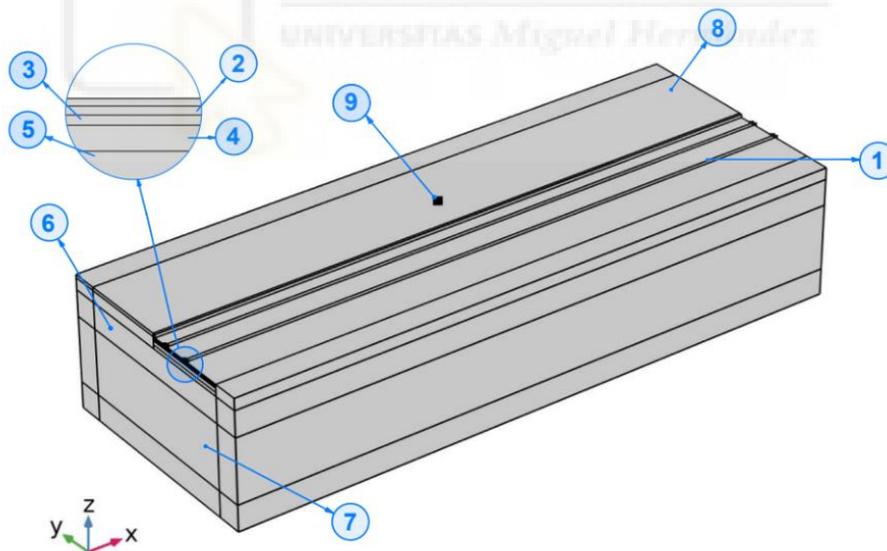


Figura 48: Partes de la geometría del modelo parametrizado.

La Tabla 9 recoge las propiedades mecánicas de los materiales empleados durante las simulaciones en el software COMSOL Multiphysics.

Zona	Material	Densidad (kg/m^3)	Módulo de Young (MPa)	Poisson
1. Rodadura	BBTM 8BM	2500	3000 MPa	0,35
2. Intermedia	AC22 bin D	2200	4000 MPa	0,33
3. Base calzada	AC32 base G	2200	5000 MPa	0,33
4. Capa intermedia	Zahorra artificial	2000	200 MPa	0,35
5. Cimiento del firme	Suelo natural	1910	50 MPa	0,3
6. Base terreno	Limos	1910	80 MPa	0,3
7. Base terreno	Suelo natural	1910	50 MPa	0,3
8. Acera	Hormigón	2400	35000 MPa	0,2
9. Acelerómetro	Aluminio	2500	69 MPa	0,33

Tabla 9: Propiedades de los materiales empleados.

El módulo de Young es una propiedad mecánica que mide la rigidez de un material sólido. Muestra la relación entre la tensión (fuerza por unidad de superficie) y la deformación (deformación proporcional) en un material en el régimen de elasticidad lineal.

El coeficiente de Poisson (ν) es un parámetro característico de cada material que indica la relación entre las deformaciones longitudinales que sufre el material en sentido perpendicular a la fuerza aplicada y las deformaciones longitudinales en dirección de la fuerza aplicada sobre el mismo.

5.5 Configuración de la fuerza

A continuación, se indica como añadir una fuerza al modelo y posteriormente se demuestra la obtención de su fórmula.

Para que la simulación de un resultado correcto debe fijarse la geometría mediante la condición de contorno 'Fixed constraint', de lo contrario esta se movería al aplicarle la fuerza y los resultados no serían precisos.

Una vez fijada la geometría, para añadir la fuerza al estudio debe configurarse mediante la ecuación 6. A continuación, se desglosa esta expresión y se explica cada una de sus partes.

$$-(IntC) \cdot (Pulso(Pini + X - Velocidad \cdot t) + Pulso(Pini + X - Velocidad \cdot t + Bat)) \quad (6)$$

En primer lugar, se define el tamaño y la forma de la huella de contacto de la fuerza con la geometría mediante la función 'rectangle', en este caso al tratarse de un estudio de vehículos, se tiene en cuenta la longitud de la huella de contacto del vehículo. La Figura 49 recoge los pasos para dar forma a la fuerza.

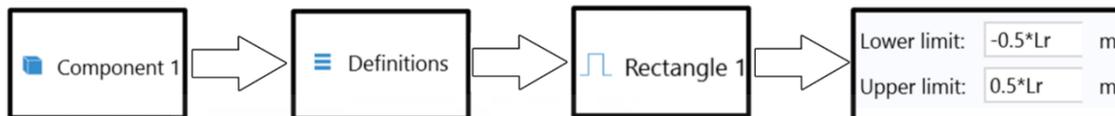


Figura 49: Diagrama de flujo configuración de la fuerza.

En la Figura 50 (a) se aprecia la geometría del contacto de la fuerza con la calzada donde la amplitud de esta es 1 y el ancho es igual a la longitud de la rueda del vehículo a simular L_r .

Una vez definida la función 'rectangle', se crea la función 'Pulso' la cual va a permitir que la fuerza corra a lo largo de la geometría. Esta función es semejante a una senoidal donde la amplitud recibe el nombre de pulso y lo que le acompaña en el paréntesis es su argumento. El argumento de la función consta de tres partes diferentes:

-Pini: Posición de las fuerzas al inicio de la simulación.

-X: Coordenada a lo largo del eje X.

-Desfase: Varía en función del tiempo siguiendo la ecuación 7

$$Desfase = Velocidad \cdot t \quad (7)$$

En la ecuación 6 referente a la fuerza, se aprecia como la ecuación 7 aparece con un signo negativo, esto es para hacer la suma dentro del paréntesis nula y que el programa dibuje la fuerza en el punto deseado del eje X.

Además, la segunda parte de la ecuación 6, cuenta con un término llamado **+Bat**, el cual separa ambas zonas de aplicación de la fuerza una distancia igual a la batalla del vehículo a estudiar haciendo así que la simulación cuente con dos puntos de aplicación de fuerza simulando de este modo las ruedas delantera y trasera del vehículo.

Por último, se ha de mencionar que la variable **IntC** es la responsable de hacer que la función aumente su amplitud dependiendo del vehículo a simular puesto que esta variable depende del peso que recae en cada rueda y del área de contacto de la huella con el suelo.

En la Figura 50 (b) podemos apreciar la representación de los diferentes parámetros que intervienen en la configuración de la ecuación de la fuerza, donde 'punto de medida' hace referencia al punto medio de la geometría donde se recogen los resultados.

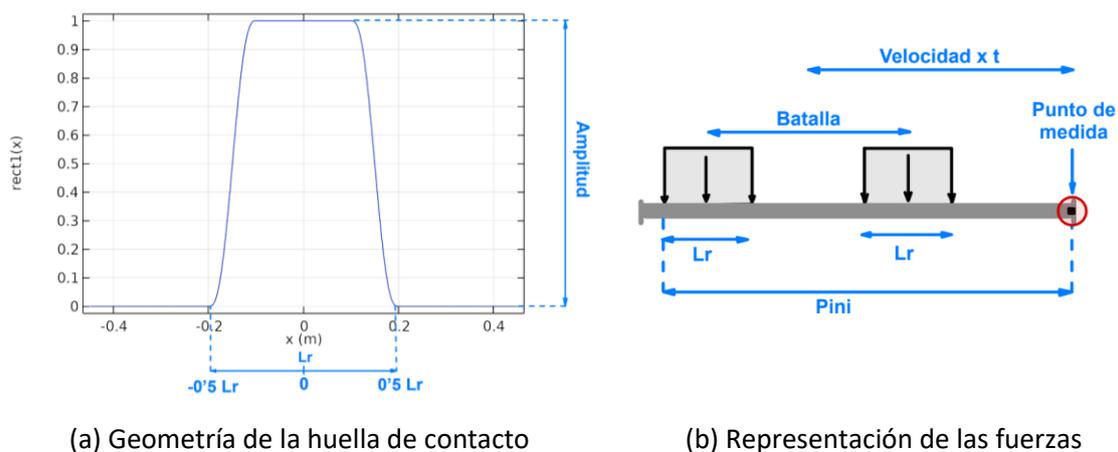


Figura 50: Programación de la fuerza.

Para la creación de la función 'Pulso' deben seguirse los pasos recogidos en la Figura 51.

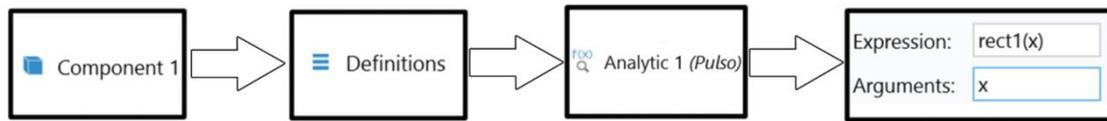


Figura 51: Creación de la función pulso.

Una vez configurada la fuerza, debe seleccionarse la parte de la geometría donde va a actuar. La zona marcada en azul en la Figura 52, es la trayectoria que sigue el vehículo con un ancho equivalente al de la rueda del vehículo que circula por la calzada y separadas una distancia igual al ancho de vías **Av**.

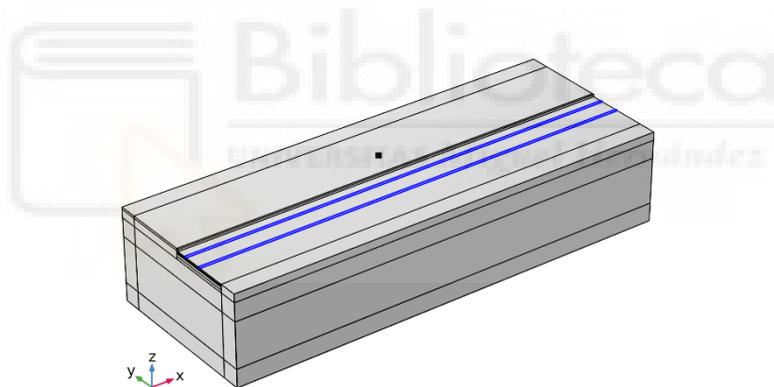


Figura 52: Carriles por los que circula la fuerza.

5.6 Creación de la malla

El mallado es una parte crucial en las simulaciones numéricas, especialmente en aquellas que involucran métodos como el Método de los Elementos Finitos (FEM)

La malla divide el dominio del problema en elementos discretos que permiten resolver las ecuaciones que gobiernan el sistema.

A continuación, se muestra como configurar una malla en el programa COMSOL. En el diagrama de flujo de la Figura 53 muestra los pasos seguidos para determinar el tamaño de la malla.

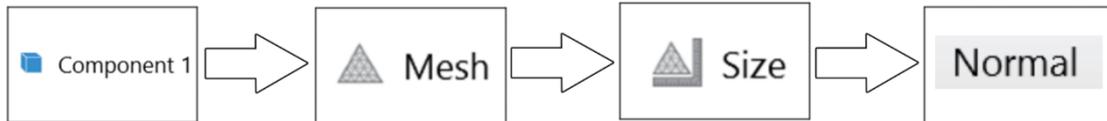


Figura 53: Diagrama de flujo para seleccionar el tamaño del mallado.

Una vez creada la función 'Size', en el desplegable de la ventana 'Settings' queda seleccionada el tamaño más conveniente para la geometría, en el caso de este proyecto se escoge la medida normal.

Para generar una malla con una geometría regular y estructurada, como se muestra en la Figura 54, se utiliza la función 'Mapped'.

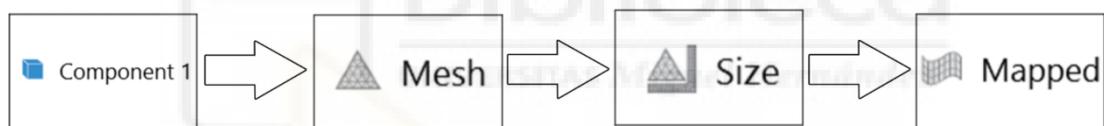


Figura 54: Diagrama de flujo para generar un mallado regular.

Después de seleccionar esta opción, se deben especificar las caras en las que se aplicará la malla. Una vez seleccionadas quedan marcadas del mismo modo que la Figura 55.

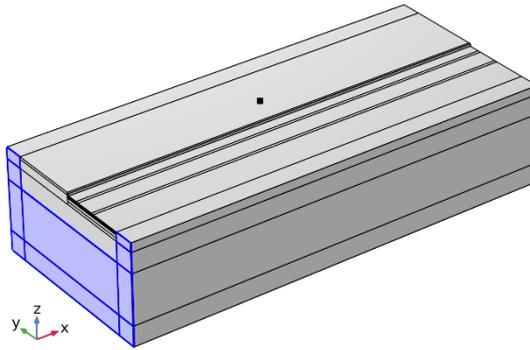


Figura 55: Caras seleccionadas para la función 'Mapped'.

Una vez seleccionada la geometría, se indica en cuantas partes se divide cada borde de las caras seleccionadas mediante la función 'Distribution'. Este proceso de operaciones se muestra en la Figura 56.

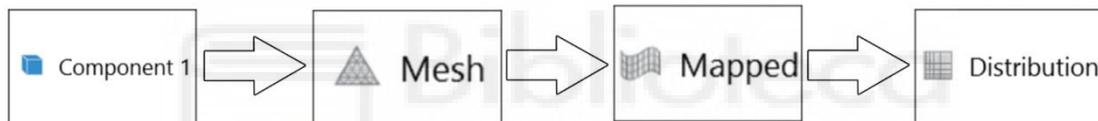


Figura 56: Diagrama de flujo para seleccionar la función 'Distribution'.

Una vez seleccionada la opción 'Distribución' deben indicarse los bodes en los que actúa y a su vez en cuantas partes se divide cada unión. Tras seleccionarlo, queda igual que en la Figura 57.

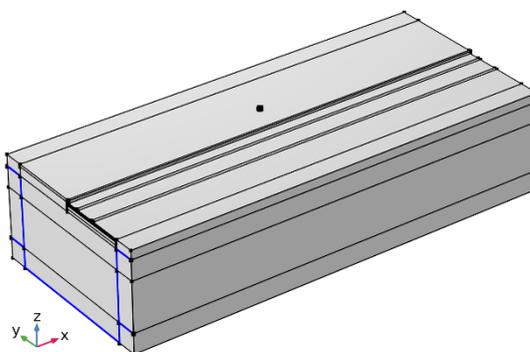


Figura 57: Selección de los bordes que se desean seccionar.

Una vez están seleccionadas las caras, sus bordes y en cuantas partes se desea dividir, queda formada una geometría mallada en la cara seleccionada (2D) como en la Figura 58.

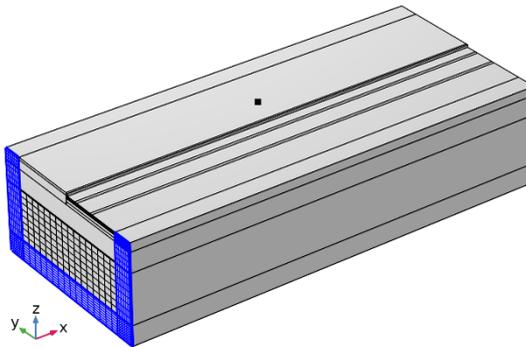


Figura 58: Cara con el mallado creado.

Para expandir el mallado a la geometría completa, se emplea la función barrido o 'Sweep', seleccionando las caras en las cuales se quiere activar dicha función.



Figura 59 Diagrama de flujo para aplicar la función barrido.

Tras aplicar los pasos mencionados en la Figura 59, la malla quedaría definida como en la Figura 60.

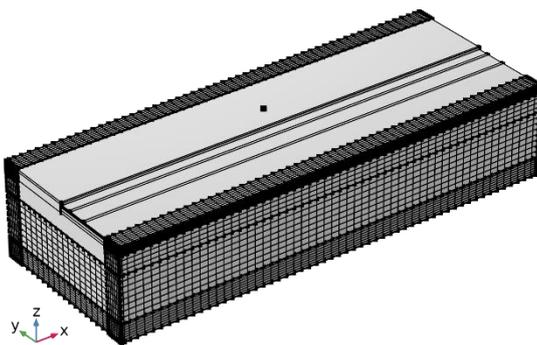


Figura 60: Geometría con la función barrido aplicada.

Por último, hay una zona de la geometría que no está mallada. Para completar el mallado, se emplea la función 'Free Tetrahedral', que se adapta automáticamente a la geometría restante.



Figura 61: Diagrama de flujo para la selección de la función 'Free Tetrahedral'.

Una vez seleccionadas todas las funciones como se muestra en la Figura 61, queda una geometría completamente mallada como en la Figura 62.

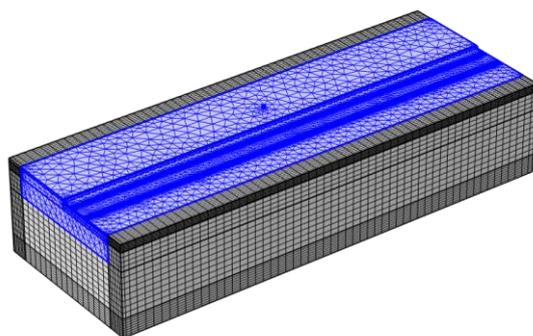


Figura 62: Geometría completa mallada.

6. RESULTADOS

En el presente apartado se exponen los resultados obtenidos a lo largo del desarrollo del trabajo. En primer lugar, se muestran los resultados obtenidos en las simulaciones. Se han realizado un total de 5 simulaciones variando entre ellas la velocidad de avance de las fuerzas.

Cabe destacar que el REAL DECRETO 1367/2007, de 19 de octubre, por el que se desarrolla la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido, en lo referente a zonificación acústica, objetivos de calidad y emisiones acústicas, hace referencia a los niveles de ruido y vibraciones permitidos en el entorno urbano.

Dicho decreto menciona el parámetro L_{aw} , (Índice de vibración): índice de vibración asociado a la molestia, o a los efectos nocivos producidos por vibraciones, limitando su valor a un máximo de 75 dB en el ámbito residencial. Por este motivo se desarrolla su ecuación [30].

El índice de vibración L_{aw} , en decibelios (dB), se determina aplicando la fórmula 8:

$$L_{aw} = 20 \lg \cdot \frac{a_w}{a_0} \quad (8)$$

Siendo:

- a_w : el máximo del valor eficaz (RMS) de la señal de aceleración, con ponderación en frecuencia W_m , en el tiempo t , $a_w(t)$, en m/s^2 .
- a_0 : la aceleración de referencia ($a_0 = 10^{-6} \cdot m/s^2$).

Los seres humanos son especialmente sensibles a vibraciones sobre el rango de 1-80 Hz según la norma ISO 2631- 2:2003: Vibraciones mecánicas y choque – evaluación de la exposición de las personas a las vibraciones globales del cuerpo – Parte 2 Vibraciones en edificios, por este motivo se presta una mayor importancia a esta franja de frecuencias [30].

En segundo lugar, se presentan las gráficas correspondientes a los ensayos experimentales, donde se analizan las aceleraciones registradas. Además, se incluye la representación en el espectro de la frecuencia, destacando de manera precisa los picos principales que permiten identificar las frecuencias predominantes en las señales obtenidas.

6.1 Resultados de simulaciones

Una vez el modelo queda definido, se realizan diferentes simulaciones variando la velocidad de avance de las fuerzas con la finalidad de observar las vibraciones generadas.

Simulación a 10 km/h:

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en la simulación realizada a 10 km/h. En la Figura 63 quedan ilustrados, por un lado, los resultados de la señal de vibraciones generadas en el tiempo y por otro lado su respectivo espectro de frecuencias mediante la transformada rápida de Fourier (FFT).

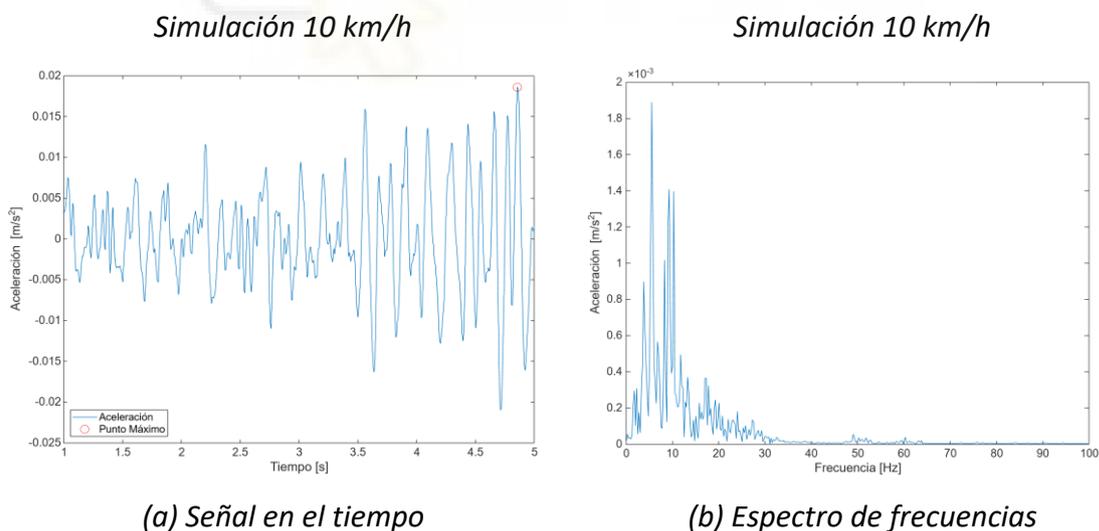


Figura 63: Resultados de la simulación a 10 km/h.

El valor de aceleración máxima se da a los 4,33 segundos de iniciar la simulación generando una vibración con una amplitud máxima de $0,0064 \text{ m/s}^2$. Respecto al espectro de frecuencias, se obtiene un pico de amplitud $0,001120 \text{ m/s}^2$ a una frecuencia de 5 Hz.

A continuación, en la Tabla 10 quedan recogidos de una forma clara y ordenada los datos mostrados en las gráficas.

	Máximo de la señal en el tiempo	Máximo de la señal en el espectro de frecuencias	
VELOCIDAD	Amplitud (m/s^2)	Amplitud (m/s^2)	Frecuencia (Hz)
10 km/h	0,0064	0,001120	5

Tabla 10: Valores de aceleración de la simulación a 10 km/h.

Simulación a 20 km/h:

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en la simulación realizada a 20 km/h. En la Figura 64 quedan ilustrados, por un lado, los resultados de la señal de vibraciones generadas en el tiempo y por otro lado su respectivo espectro de frecuencias mediante la transformada rápida de Fourier (FFT).

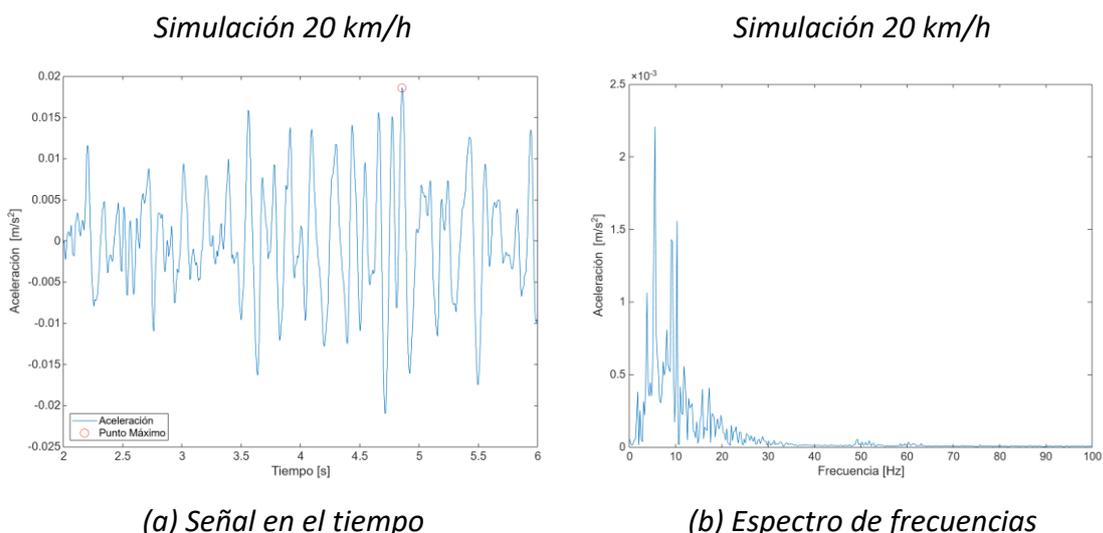


Figura 64: Resultados de la simulación a 20 km/h.

El valor de aceleración máxima se da a los 4,72 segundos de lanzarse la simulación, alcanzando una vibración con una amplitud máxima de $0,018599 \text{ m/s}^2$. Respecto al espectro de frecuencias, se obtiene un pico de amplitud $0,0022 \text{ m/s}^2$ a una frecuencia de 5,5 Hz.

A continuación, en la Tabla 11 quedan recogidos de una forma clara y ordenada los datos mostrados en las gráficas.

	Máximo de la señal en el tiempo	Máximo de la señal en el espectro de frecuencias	
VELOCIDAD	Amplitud (m/s^2)	Amplitud (m/s^2)	Frecuencia (Hz)
20 km/h	0,018599	0,0022	5,5

Tabla 11: Valores de aceleración de la simulación a 20 km/h.

Simulación a 30 km/h:

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en la simulación realizada a 30Km/h. En la Figura 65 quedan ilustrados, por un lado, los resultados de la señal de vibraciones generadas en el tiempo y por otro lado su respectivo espectro de frecuencias mediante la transformada rápida de Fourier (FFT).

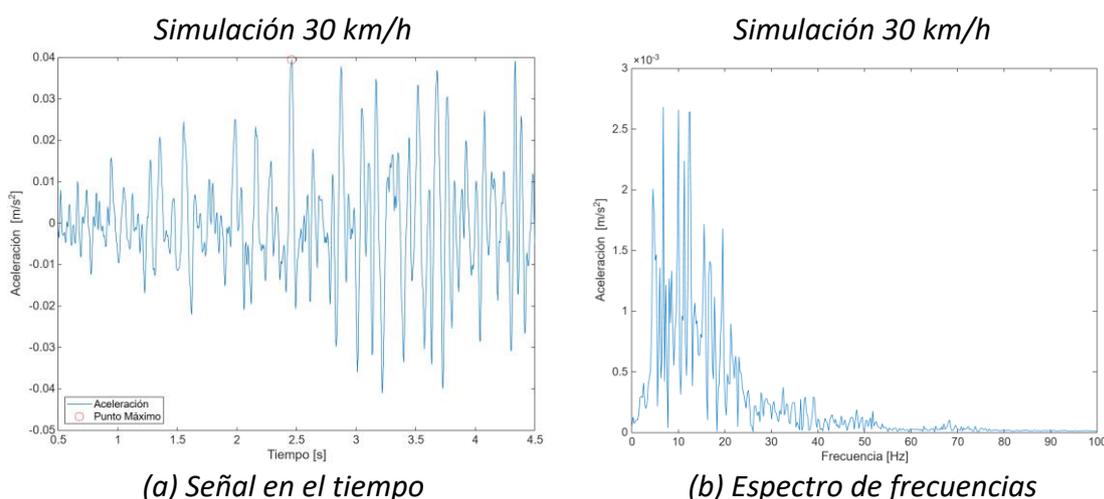


Figura 65: Resultados de la simulación a 30 km/h.

El valor de aceleración máxima se da en el instante de tiempo 2,52 segundos con una amplitud máxima de $0,0395 \text{ m/s}^2$. Respecto a los valores en el espectro de frecuencias, se obtiene un pico de amplitud $0,002679 \text{ m/s}^2$ a una frecuencia de 6,5 Hz.

A continuación, en la Tabla 12 quedan recogidos de una forma clara y ordenada los datos mostrados en las gráficas.

	Máximo de la señal en el tiempo	Máximo de la señal en el espectro de frecuencias	
VELOCIDAD	Amplitud (m/s^2)	Amplitud (m/s^2)	Frecuencia (Hz)
30 km/h	0,0395	0,002816	12,5

Tabla 12: Valores de aceleración de la simulación a 30 km/h.

Simulación a 40 km/h:

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en la simulación realizada a 40Km/h. En la Figura 66 quedan ilustrados, por un lado, los resultados de la señal de vibraciones generadas en el tiempo y por otro lado su respectivo espectro de frecuencias mediante la transformada rápida de Fourier (FFT).

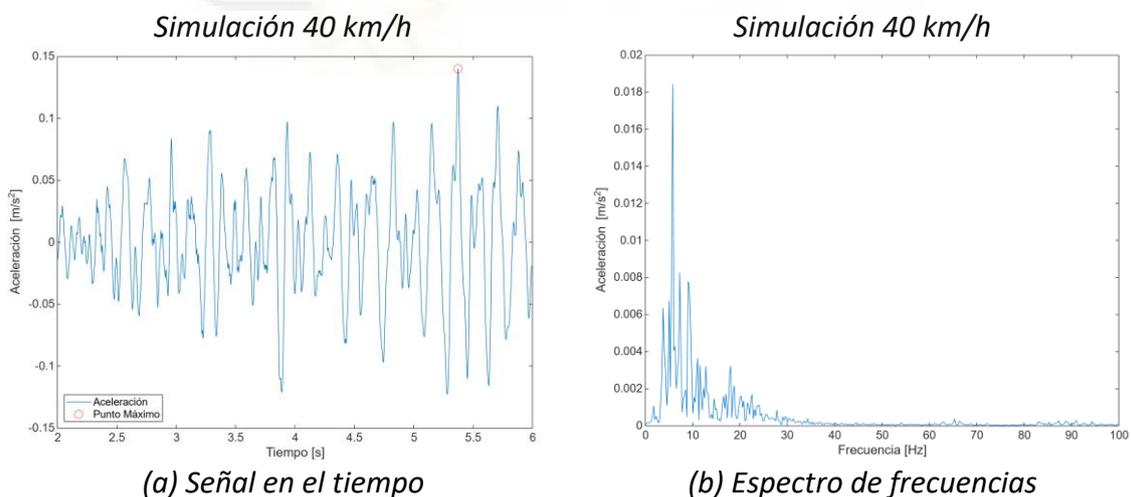


Figura 66: Resultados de la simulación a 40 km/h.

Por un lado, el valor de aceleración máxima se da en el instante de tiempo 5,35 segundos con una amplitud de $0,140 \text{ m/s}^2$. Por otro lado, respecto a los resultados en

el espectro de frecuencias, se obtiene un pico de amplitud $0,01842 \text{ m/s}^2$ a una frecuencia de 5,75 Hz.

Todos estos datos quedan recogidos de una forma clara y ordenada en la Tabla 13.

	Máximo de la señal en el tiempo	Máximo de la señal en el espectro de frecuencias	
VELOCIDAD	Amplitud (m/s^2)	Amplitud (m/s^2)	Frecuencia (Hz)
40 km/h	0,140	0,01842	5,75

Tabla 13: Valores de aceleración de la simulación a 40 km/h.

Simulación a 50 km/h:

Por último, se muestran los resultados obtenidos en la simulación realizada a 50Km/h. En la Figura 67 quedan ilustrados, por un lado, los resultados de la señal de vibraciones generadas en el tiempo y por otro lado su respectivo espectro de frecuencias mediante la transformada rápida de Fourier (FFT).

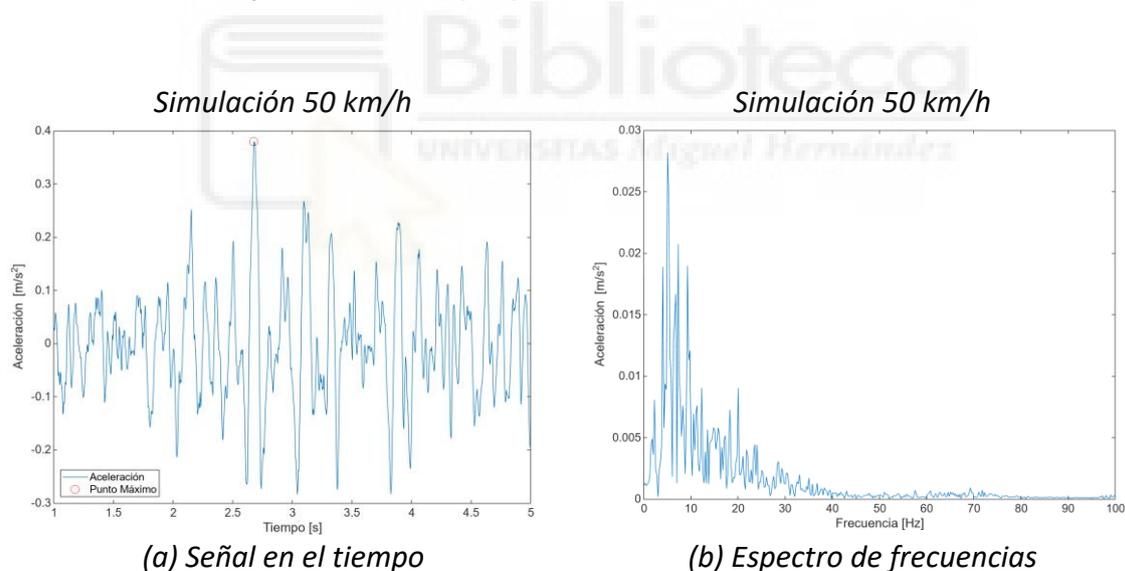


Figura 67: Resultados de la simulación a 50 km/h.

El valor de aceleración máxima se da a los 2,43 segundos con una amplitud máxima de $0,3794 \text{ m/s}^2$. En el espectro de frecuencias, se obtiene un pico de amplitud $0,03821 \text{ m/s}^2$ a una frecuencia de 5,5 Hz.

A continuación, en la Tabla 14 quedan recogidos de una forma clara y ordenada los datos mostrados en las gráficas.

	Máximo de la señal en el tiempo	Máximo de la señal en el espectro de frecuencias	
VELOCIDAD	Amplitud (m/s^2)	Amplitud (m/s^2)	Frecuencia (Hz)
50 km/h	0,3794	0,03821	5,5

Tabla 14: Valores de aceleración de la simulación a 50Km/h.

Una vez mostrados los resultados de todas las simulaciones realizadas, estos se recopilan y organizan en la Tabla 15. Esto permite una comparación más clara y detallada entre los datos obtenidos de cada una de las simulaciones, facilitando así el análisis y la interpretación de los resultados.

SIMULACIONES							
VELOCIDAD	Máximos en el espectro de frecuencias		Máximo de la señal en el tiempo		RMS		L_{aw}
	Amplitud (m/s^2)	Frecuencia (Hz)	Amplitud (m/s^2)	Instante (s)	Amplitud (m/s^2)	Instante (s)	dB
10 km/h	0,001120	5	0,0064	4,33.	0,0024	3-4	67,6
20 km/h	0,0022	5,5	0,018599	4,72.	0,0091	3-4	79,18
30 km/h	0,002679	6,5	0,0395	2,52	0,0182	2-3	85,2
40 km/h	0,01842	5,75	0,140	5,35	0,0441	2-3	92,88
50 km/h	0,3821	5,5	0,3794	2,43	0,1292	1-2	102,22

Tabla 15: Resultados de las simulaciones.

Tal y como se ha mencionado en la introducción, la velocidad de circulación junto con las irregularidades que se encuentran en la vía son uno de los principales generadores de vibraciones [2],[3],[6],[11].

A continuación, para plasmar de forma clara la influencia de la velocidad en el aumento de la amplitud de las vibraciones, en la Figura 68 se representan los valores

máximos de amplitud tanto en el espectro de frecuencias como en el entorno del tiempo obtenidos en las diferentes simulaciones. Cabe destacar que para representar de la mejor manera posible esta variación se ha optado por emplear una escala logarítmica.

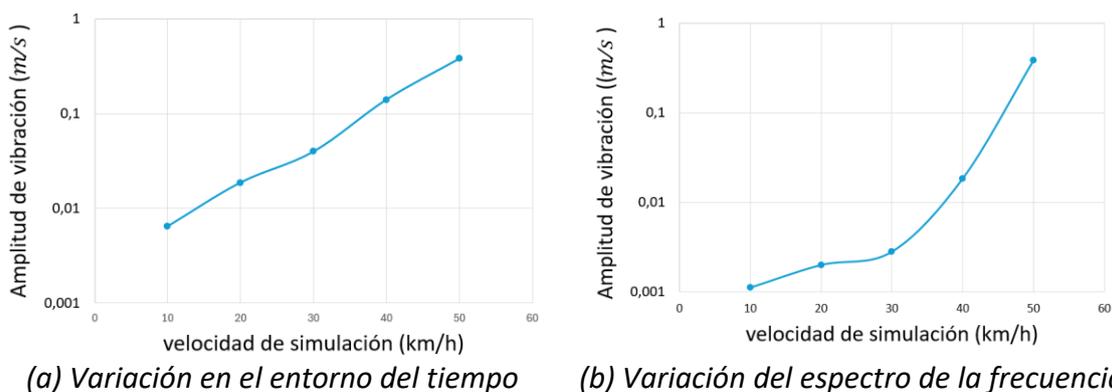


Figura 68: Influencia de la velocidad de circulación en la generación de vibraciones.

La Figura 69 muestra como en este caso el aumento de la velocidad no tiene influencia en la frecuencia a la que se generan los picos.



Figura 69: Variación de la frecuencia respecto a la velocidad.

Por último, en la ecuación (8) se muestra como el índice de vibración L_{aw} es directamente proporcional al máximo del valor eficaz (RMS) de la señal de aceleración en el tiempo. Por este motivo, al aumentar el valor eficaz de la aceleración en el tiempo, aumenta el valor L_{aw} tal y como refleja la figura 70.

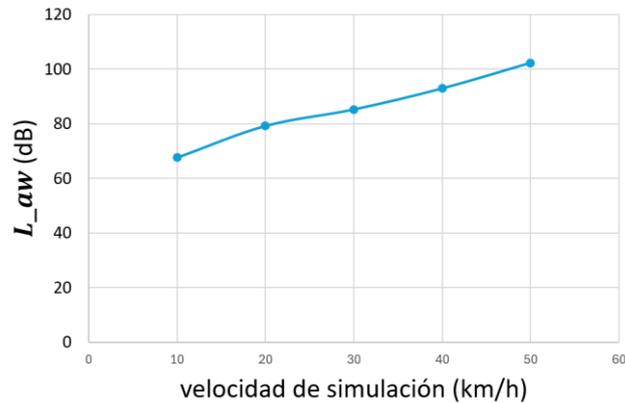


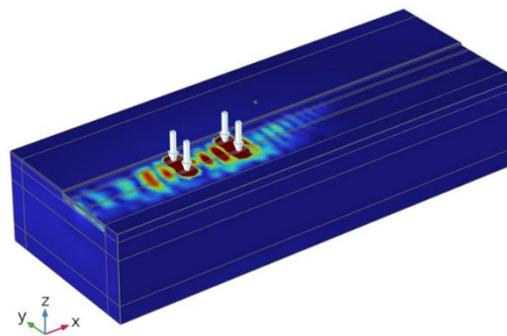
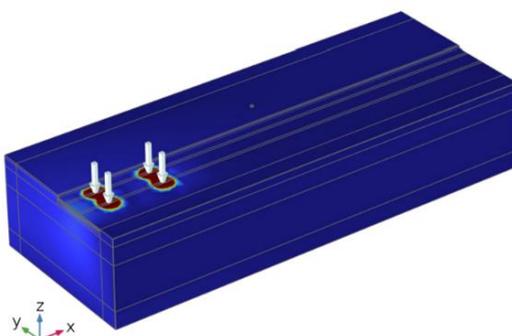
Figura 70: Aumento de los dB debido a la velocidad.

Una vez hecha la comparación de los resultados, como ya se ha introducido en el apartado 5, se muestra el modelo creado en el software COMSOL.

La geometría muestra una distribución de colores que representa la respuesta vibracional. El color azul identifica zonas con baja amplitud de vibración, mientras que los colores cálidos (verde, amarillo y rojo) destacan las regiones con mayor intensidad o desplazamiento debido a la propagación de las ondas de vibración generadas por las fuerzas aplicadas.

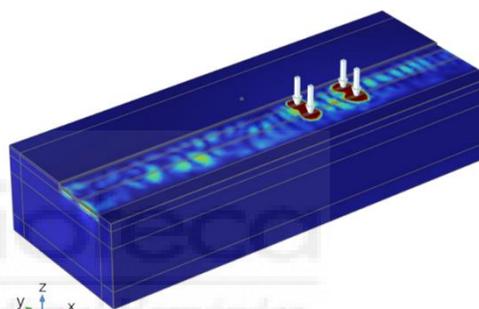
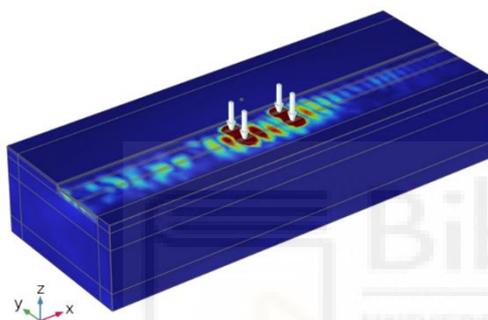
Por otro lado, las flechas blancas simulan los puntos de apoyo de las 4 ruedas del vehículo desplazándose a lo largo de la calzada durante el tiempo que dura la simulación.

A continuación, la Figura 71 muestra cinco instantes específicos a lo largo de la simulación. Estas imágenes han sido seleccionadas para ilustrar el desplazamiento de la fuerza a través de toda la geometría en diferentes momentos del proceso. Cada una de las figuras refleja el comportamiento dinámico de la fuerza en un punto determinado de la geometría, permitiendo observar cómo varía la distribución y propagación de vibraciones a lo largo de la estructura.



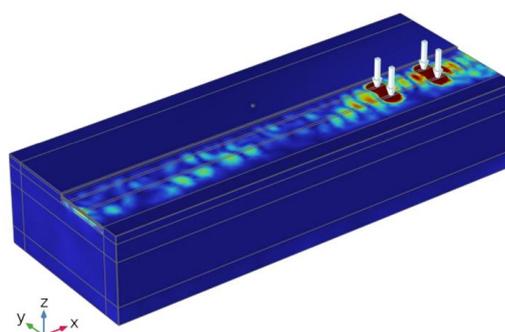
(a) Simulación en instante de tiempo $t=0$.

(b) Simulación en instante de tiempo $t=1$.



(c) Simulación en instante de tiempo $t=2$.

(d) Simulación en instante de tiempo $t=3$.



(e) Simulación en instante de tiempo $t=4$.

Figura 71: Representación de la simulación.

Como es de esperar, se genera una mayor concentración de vibraciones en las áreas cercanas a los puntos de aplicación de la fuerza. El análisis refleja cómo la carga dinámica interactúa con la geometría del sistema, imitando las condiciones reales que ocurren durante el paso de un vehículo.

Puede parecer que solo se generan vibraciones en la calzada y no llegan a la acera puesto que es la única zona coloreada pero este efecto es debido al haber un cambio de medio y de material entre la calzada (lugar por el que circula el vehículo), y la acera (lugar donde se ubica el acelerómetro).

Como se puede apreciar en la imagen (c) de la Figura 71, las fuerzas están programadas para pasar frente al acelerómetro justo en el instante de tiempo correspondiente a $t/2$, sin embargo, el pico de vibraciones no se da justo en ese preciso momento como se podría intuir, esto puede ser debido al tiempo que tarda la onda de vibración en propagarse por el medio hasta llegar al acelerómetro.

Los tiempos de propagación varían en función de los materiales empleados y la distancia a la que se encuentre el acelerómetro y su resolución aporta el desfase entre el paso del vehículo y la recepción del acelerómetro.

6.2 Resultados de ensayos experimentales

Dentro de los ensayos experimentales, se distinguen las medidas realizadas en diversos puntos de la ciudad de Elche. El punto 1 corresponde al ubicado en el Paseo de la Estación, mientras que el punto 2 muestra las medidas realizadas en la Avenida de Jubalcoy.

6.2.1 Punto 1: Paseo de la Estación

La Figura 72 presenta los datos de vibraciones en el espectro de frecuencias y en el entorno del tiempo de tres medidas de ruido, realizadas con el objetivo de verificar que las muestras no estén afectadas por ruido de fondo.

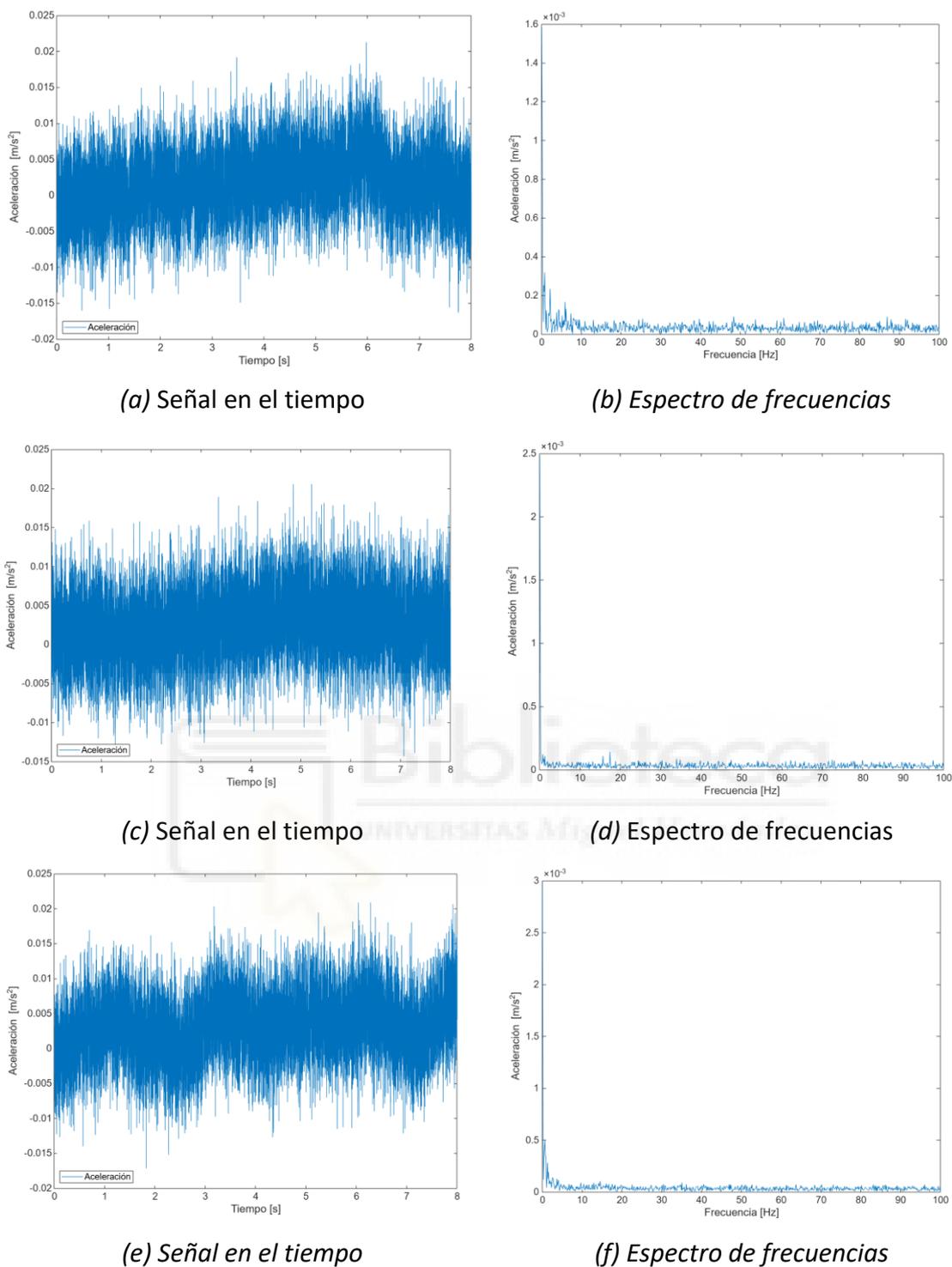


Figura 72: Graficas de ruido del punto de medida 1.

Medida 1,1:

La medida 1,1 capta las vibraciones generadas por el paso de dos turismos simultáneamente, por este motivo se aprecia en la gráfica (a) de la Figura 73, dos claros aumentos de la amplitud de la señal en el tiempo.

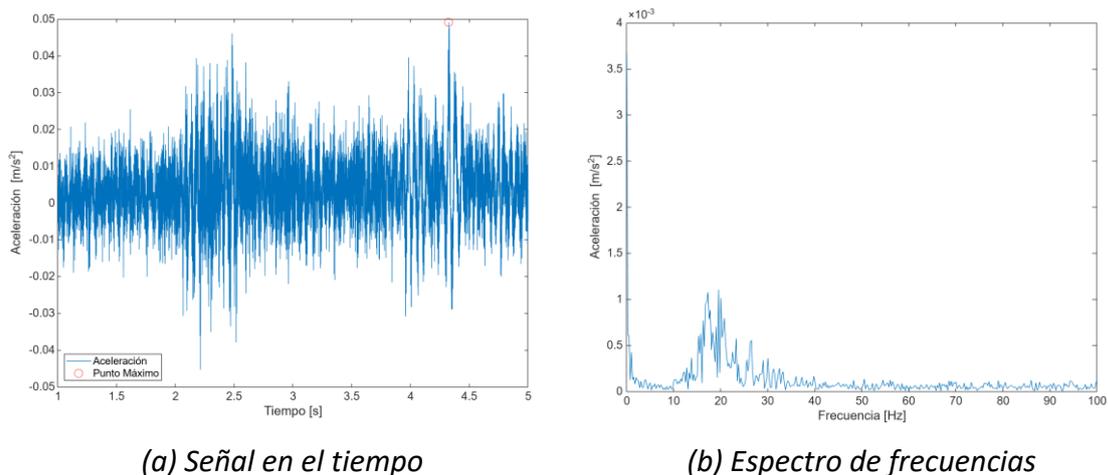


Figura 73: Medidas del paso de dos vehículos simultáneamente.

El valor de aceleración máxima se da en el instante de tiempo 4,3255 segundos con una amplitud máxima de $0,0476 \text{ m/s}^2$. Respecto a los valores en el espectro de frecuencias FFT, se obtiene un pico de amplitud $0,001103 \text{ m/s}^2$ a una frecuencia de 19,5 Hz.

Medida 1,2:

La medida 1,2 registra el paso de un autobús modelo Urbino 12 de Solaris a una velocidad de circulación de 30 Km/h. Como es de esperar y más adelante se muestra, debido a su mayor masa en comparación con los turismos, las vibraciones generadas por el autobús tienen una mayor amplitud tal y como refleja la Figura 74.

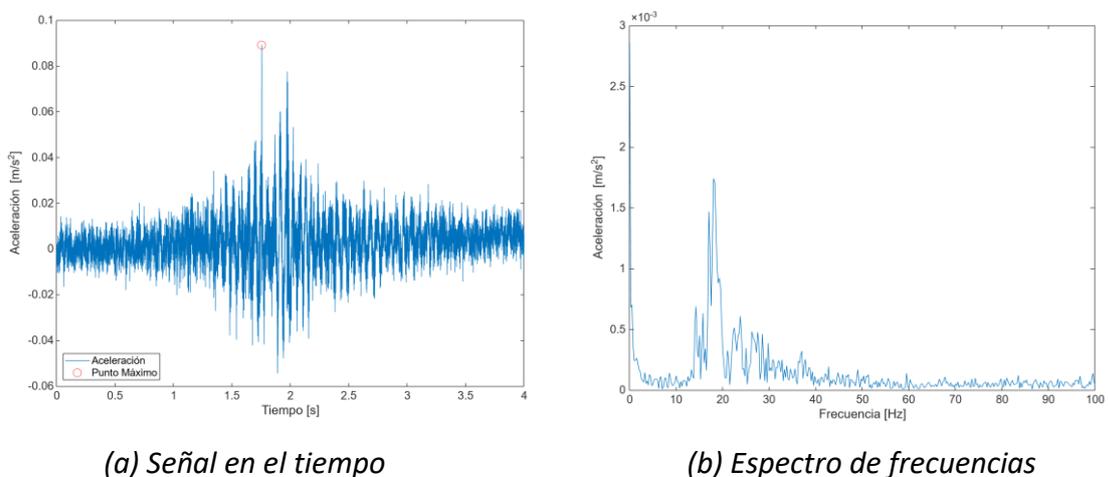


Figura 74: Medidas del paso de un camión ligero.

El valor de aceleración máxima se da en el segundo 1,755 de la medida con una amplitud máxima de $0,089226 \text{ m/s}^2$. Respecto a los valores en el espectro de la frecuencia FFT, se obtiene un pico de amplitud $0,00174 \text{ m/s}^2$ a una frecuencia de 18 Hz.

Medida 1,3:

La medida 1,3 registra el paso de un autobús modelo Urbino 12 de Solaris a una velocidad de circulación de 30 Km/h.

En la Figura 75 quedan ilustrados, por un lado, los resultados de la señal de vibraciones generadas en el tiempo y por otro lado su respectivo espectro de frecuencias FFT.

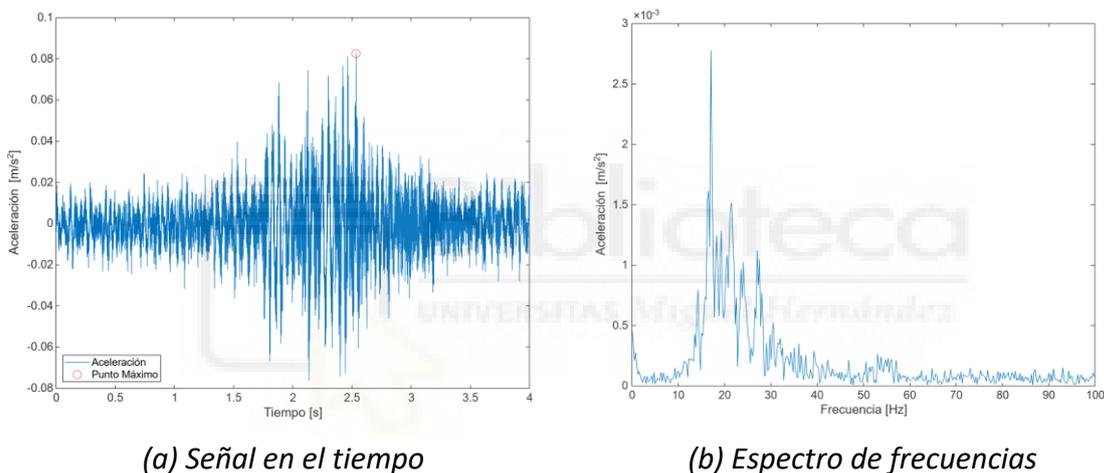


Figura 75: Medidas del paso de un autobús.

El valor de aceleración máxima se da en el instante de tiempo 2,533 segundos con una amplitud máxima de $0,08248 \text{ m/s}^2$. Respecto a los valores en el espectro de frecuencias FFT, se obtiene un pico de amplitud $0,002774 \text{ m/s}^2$ a una frecuencia de 17 Hz.

Medida 1,4:

La medida 1,4 registra el paso de un autobús Urbino 12 de Solaris a 30 Km/h. En la Figura 76 aparecen por un lado, los resultados de la señal de vibraciones generadas en

el tiempo y por otro lado su respectivo espectro de frecuencias tras el paso por el punto de medida 1.

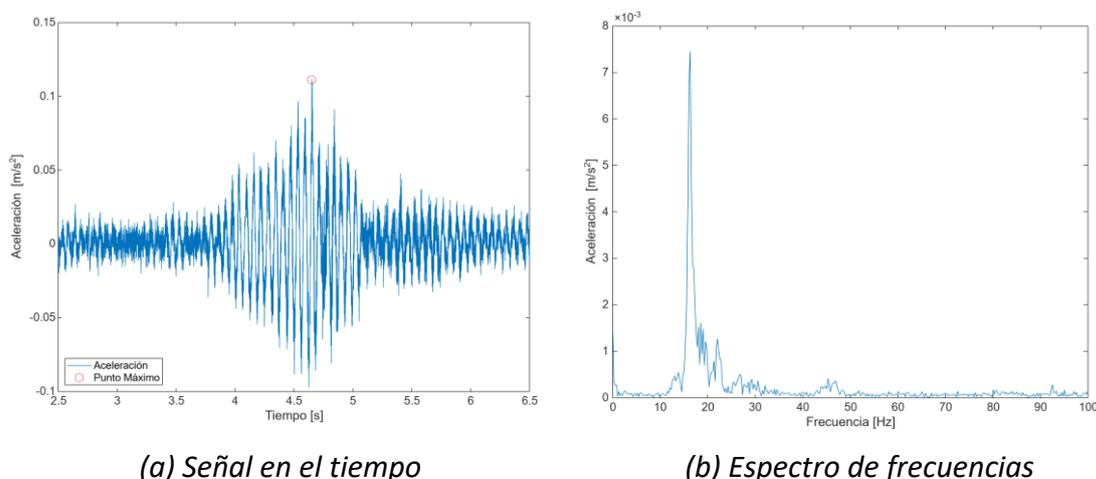


Figura 76: Medidas del paso de un autobús.

El valor de aceleración máxima se da en el instante 4,651 segundos con una amplitud máxima de $0,11135 \text{ m/s}^2$. Respecto a los valores en el espectro de frecuencias, se obtiene un pico de amplitud $0,00745 \text{ m/s}^2$ a una frecuencia de 16,25 Hz.

Una vez mostrados todos los resultados en el punto de medida 1, en la Tabla 16 se agrupan los datos relevantes de todas las gráficas obtenidas: los valores de amplitud y frecuencia de los picos de las gráficas, así como los valores máximos de la aceleración y en que instante de tiempo se dan para posteriormente facilitar realizar una comparación entre medidas y obtener conclusiones.

Punto1: Paseo de la Estación				
Medida	Máximo en el espectro de frecuencias		Máximo gráfica vibraciones	
	Amplitud	Frecuencia	Amplitud	Instante
1,1	$1,1 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}^2$	19,5 Hz	$0,0476 \text{ m/s}^2$	4,3255 s.
1,2	$1,74 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}^2$	18 Hz	$0,0892 \text{ m/s}^2$	1,7555 s.
1,3	$2,774 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}^2$	17 Hz	$0,08248 \text{ m/s}^2$	2,5330 s.
1,4	$7,45 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}^2$	16,25 Hz	$0,11135 \text{ m/s}^2$	4,6510 s.

Tabla 16: Recopilación de resultados en el punto de medida 1.

En la Figura 77 queda representada una comparación entre los valores máximos de amplitud recogidos en las diferentes medidas.

De esta manera se muestra la influencia del peso en la generación de vibraciones producidas por el tráfico rodado, puesto que las tres medidas de autobuses tienen un valor similar de amplitud entre ellos mientras que la que registra el paso de dos turismos es aproximadamente la mitad.

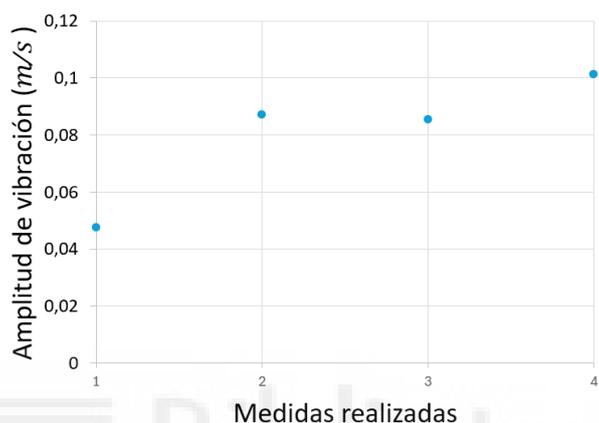
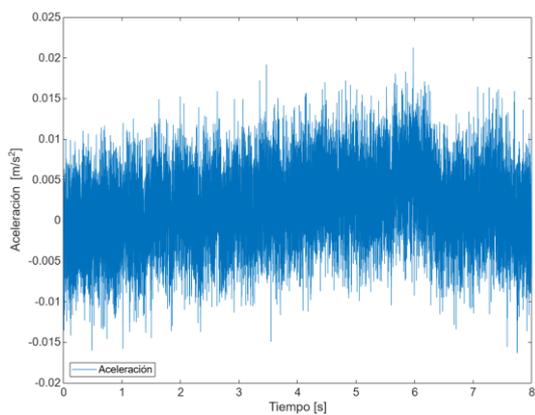


Figura 77: Comparación de valores máximos de amplitud.

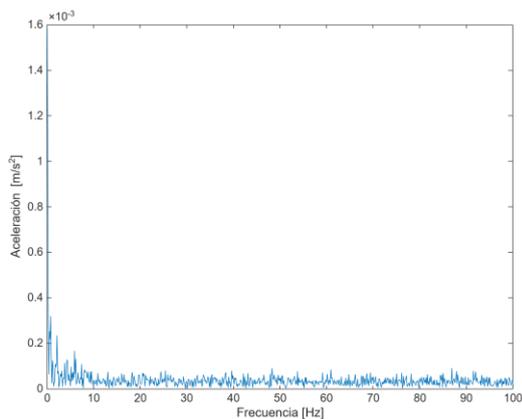
6.2.2 Punto 2: Avenida de Jubalcoy

Las medidas en este punto se llevaron a cabo con un resalto en la calzada con la finalidad de cuantificar el efecto de las irregularidades en la generación de vibraciones.

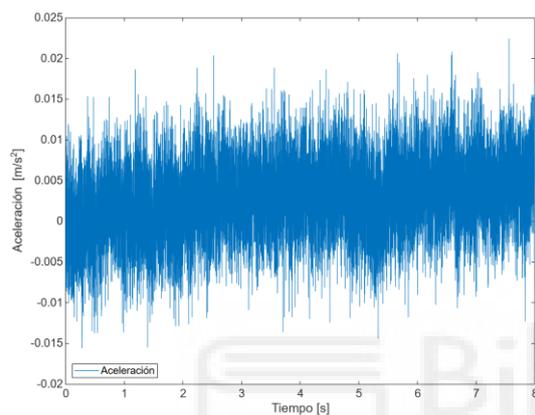
La Figura 78 presenta los datos de vibraciones en el espectro de frecuencias y en el entorno del tiempo de tres medidas de ruido, realizadas con el objetivo de verificar que las muestras no estén afectadas por ruido de fondo.



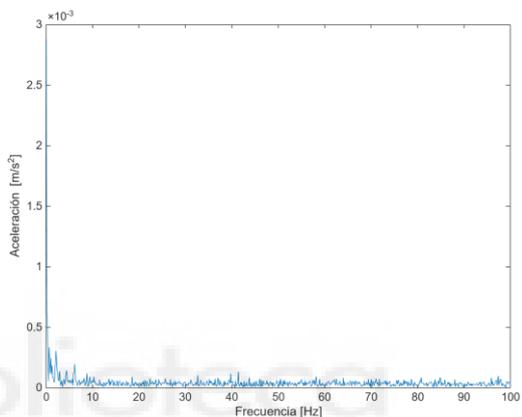
(a) Señal en el tiempo



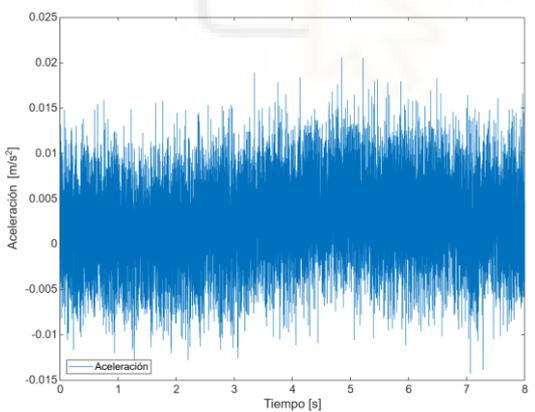
(b) Espectro de frecuencias



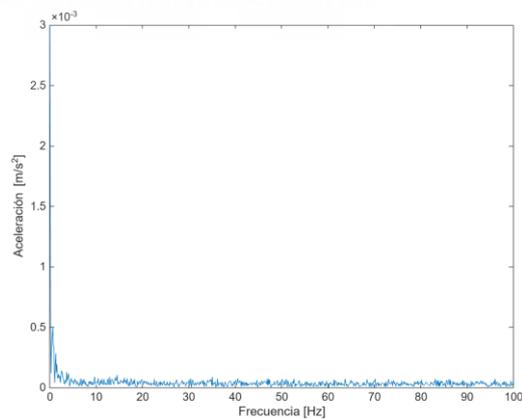
(c) Señal en el tiempo



(d) Espectro de frecuencias



(e) Señal en el tiempo



(f) Espectro de frecuencias

Figura 78: Graficas de ruido del punto de medida 2.

Medida 2,1:

La medida 2,1 capta las vibraciones generadas por el paso de un autobús Urbino 12 de Solaris por una tapa de registro con la finalidad de apreciar la influencia de las irregularidades en la generación de vibraciones debidas al tráfico rodado.

En la Figura 79 quedan ilustrados, por un lado los resultados de la señal de vibraciones generadas en el tiempo y por otro lado su respectivo espectro de frecuencias FFT.

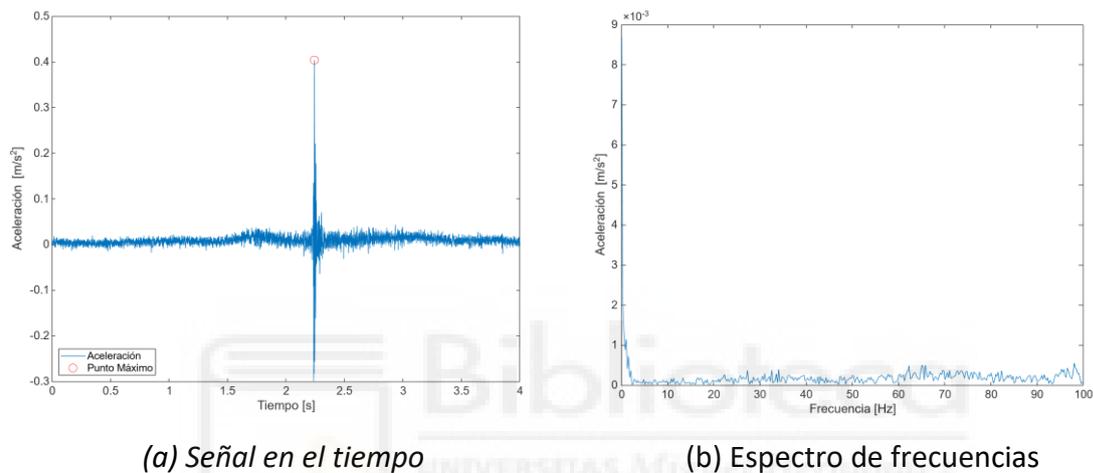


Figura 79: Medidas del paso de un autobús sobre una tapa de registro.

El valor de aceleración máxima se da en el instante de tiempo 2,33 segundos con una amplitud máxima de $0,40372 \text{ m/s}^2$.

Medida 2,2:

Al igual que la anterior medida, la medida 2,1 capta las vibraciones generadas por el paso de un autobús Urbino 12 de Solaris por una tapa de registro, en este caso haciendo pasar ambos neumáticos por la tapa de registro.

En la Figura 80 se muestran los resultados de la señal de vibraciones generadas en el tiempo y su respectivo espectro de frecuencias FFT.

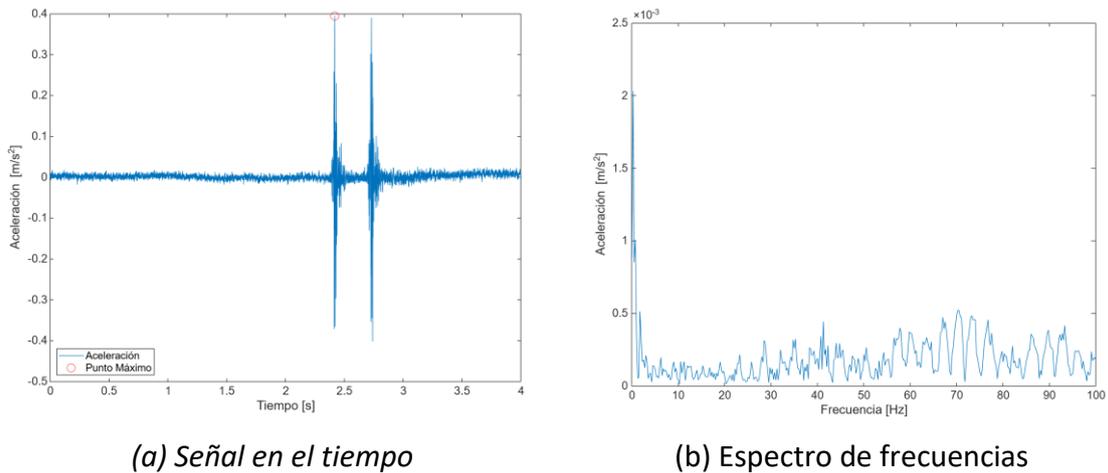


Figura 80: Medidas del paso de un autobús sobre una tapa de registro.

El valor de aceleración máxima se da en el instante de tiempo 2,417 segundos con una amplitud máxima de $0,3940 \text{ m/s}^2$.

En la Tabla 17 quedan recogidos los datos de las medidas con irregularidades en la calzada.

Medida	Amplitud
2,1	$0,40372 \text{ m/s}^2$
2,2	$0,394 \text{ m/s}^2$

Tabla 17: Picos máximos de medidas con irregularidades.

Puede apreciarse claramente como en las medidas con una irregularidad en la calzada, el valor de la aceleración es notablemente más elevado siendo del orden de $0,4 \text{ m/s}^2$ como muestra la Tabla 17, a diferencia de cuando no hay ningún desperfecto en la calzada que los picos máximos son cercanos a $0,1 \text{ m/s}^2$, es decir, se obtienen valores de aceleración 4 veces más grandes.

Para ver este fenómeno de una manera clara, en la Figura 81 quedan representas las vibraciones generadas durante el paso de un autobús en dos situaciones:

- **Gráfica azul:** Corresponde al paso de un autobús sobre una tapa de registro (irregularidad).
- **Gráfica naranja:** Representa el paso de un autobús circulando sobre una calzada en buen estado. La señal muestra variaciones menores,
- **Gráfica amarilla:** Corresponde a la medida del ruido de fondo, es decir, las vibraciones del entorno en ausencia de vehículos.

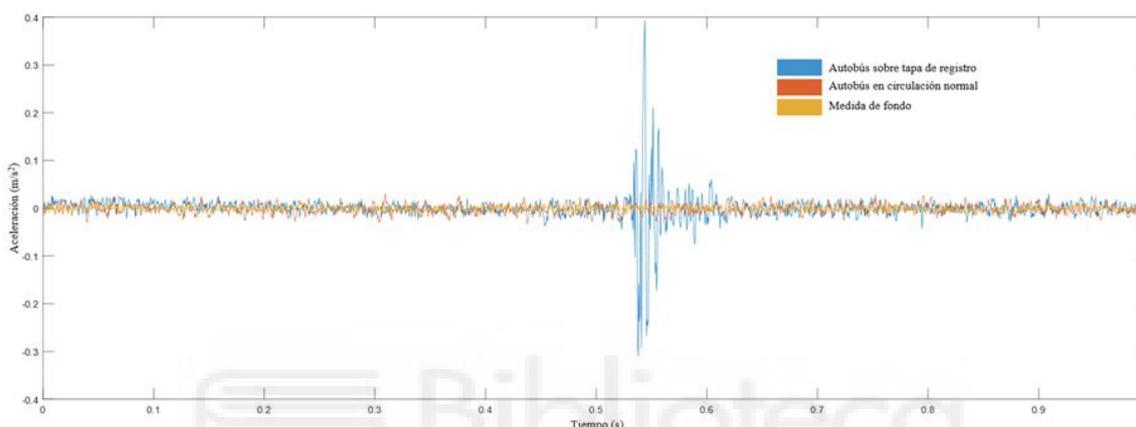


Figura 81: Efecto de las irregularidades en la generación de vibraciones.

Este análisis muestra cómo las irregularidades en la vía influyen significativamente en las vibraciones generadas por los vehículos, lo que puede ser crucial en estudios de impacto en infraestructuras cercanas, confort de los pasajeros además del bienestar de individuos cercanos al foco emisor de vibraciones.

6.3 Resultados de ensayos en Uruguay

Este TFG participa en el Programa de proyectos docentes de internacionalización en casa PRODIC-UMH del Vicerrectorado de Internacionalización y Cooperación de la UMH.

Por este motivo, se desarrolla en colaboración con el estudio titulado "*Vibraciones generadas por tráfico, trabajo experimental, Montevideo, Uruguay*" [31] realizado por D. Julián Ortiz Umaña, el cual también aborda la medida de vibraciones vehiculares.

La presente investigación conjunta tiene el objetivo de analizar y evaluar las vibraciones originadas por los vehículos al transitar sobre diversos tipos de pavimentos. El enfoque del estudio es comprender el impacto de estas vibraciones en el bienestar de los ciudadanos y el estado de las infraestructuras. Además, gracias a la parametrización del modelo realizado en COMSOL, puede adaptarse fácilmente su geometría para simular diferentes puntos de medida.

Las condiciones en las que se llevan a cabo las medidas son similares en ambos estudios, guardando una distancia respecto al eje de la calzada de entre 5 y 7 metros además de centrarse en el estudio del mismo tipo de vehículos: autobuses.

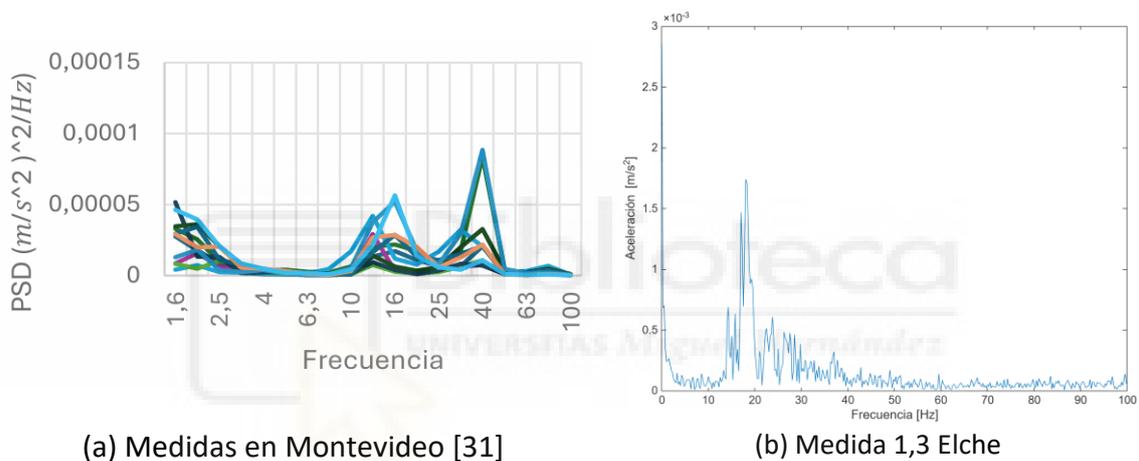


Figura 82: Medida Montevideo VS Medida Elche

Respecto a los resultados de ambas gráficas, en la Figura 82 se aprecian picos en frecuencias inferiores a 3 Hz y en el rango de frecuencias entre 10 y 45 Hz.

Por un lado, las frecuencias hasta 2,5 Hz pueden atribuirse al sistema de suspensión neumática de los buses [32],[33],[34]. Por otro lado, el siguiente rango de frecuencias tiene una particularidad interesante debida al material de construcción de la vía. Al tratarse de pavimento asfáltico muestra un inicio de amplificación de energía a los 10 Hz y un corte de energía sobre 25 Hz [34]. En otros tipos de vías, como las fabricadas de hormigón, esta atenuación se amplía hasta los 40 Hz tal y como se ve en la Figura 83 en unas medidas realizadas en Montevideo [35].

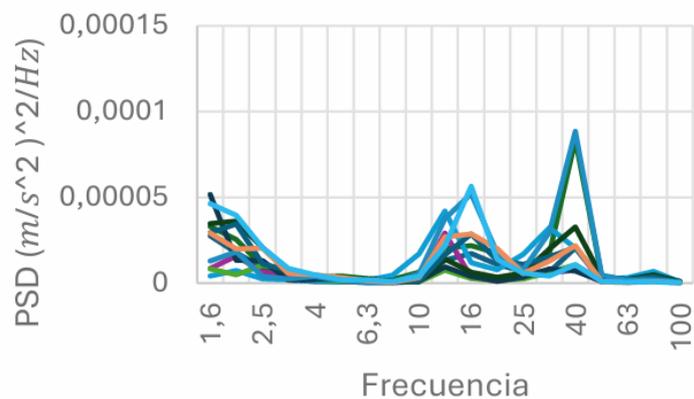


Figura 83: Medidas en calzada de hormigón [31].

Las frecuencias de salto de eje se encuentran el rango de 10 a 15 Hz, estando dentro de la posibilidad que esa generación de energía sea debido a este salto y el restante debida a la vibración del material de la calzada [36].



7. CONCLUSIONES

A continuación, se presentan los resultados de la investigación de vibraciones producidas por el tráfico rodado llevada a cabo tanto en la ciudad de Elche como en la ciudad de Montevideo por la Universidad de la República de Uruguay. Por un lado, se ha desarrollado un modelo numérico en el software COMSOL Multiphysics que permite predecir la propagación de las vibraciones generadas en entornos urbanos. Para ello se ha diseñado una geometría variable de forma parametrizada que permite adaptar el modelo a diferentes tipologías de vías, así como simular diferentes vehículos y velocidades de circulación. Por otro lado, se han realizado diferentes medidas experimentales en dos puntos distintos de la ciudad de Elche: La Avenida de Jubalcoy y El Paseo de la Estación además de las llevadas a cabo en Montevideo por D. Julián Ortiz Umaña. Gracias tanto a las medidas experimentales como a los resultados de las simulaciones pueden exponerse algunas conclusiones:

Respecto a las vibraciones en el entorno del tiempo, los vehículos pesados son los que producen vibraciones más significativas en el terreno por el que circulan tal y como muestra la Figura 77 en la que se compara la amplitud máxima de las vibraciones generadas por el paso de un turismo y un autobús. La velocidad de circulación también tiene influencia en la intensidad de las vibraciones generadas por el paso de vehículos, gracias a las simulaciones en COMSOL se muestra esta influencia en la Figura 68 apreciándose como se incrementa más de 10 veces la amplitud entre una velocidad de 10 km/h y una velocidad de 50 km/h. Por último, la presencia de irregularidades en la calzada, como pueden ser grietas, baches, resaltos o tapas de registro multiplican la amplitud de las vibraciones haciendo que estas sean hasta 4 veces mayores tal y como refleja la Figura 81.

Por otro lado, en el espectro de frecuencias la influencia de la velocidad no afecta a la frecuencia en la que se generan los picos de energía siendo estos constantes en un valor de 5 Hz tal y como muestra la Figura 69. Además, se ha demostrado gracias a las medidas experimentales que el peso de los vehículos tampoco tiene influencia en la

frecuencia en la que se generan los picos siendo todos estos constantes en un valor de 15 Hz tanto para turismos como para autobuses.

El modelo actual permite simular el paso de un vehículo contemplando el peso de este como una fuerza constante que se desplaza a lo largo de la calzada, para futuras investigaciones se está trabajando en incluir al modelo la física de las imperfecciones de la calzada gracias a un sistema masa-muelle que logre representar la influencia de las irregularidades y las texturas del pavimento en los resultados obtenidos de vibraciones. De este modo, los resultados serán más afines a la realidad.

Por último, cabe destacar que el presente trabajo forma parte del artículo titulado "*Análisis de las vibraciones generadas por el tráfico en entornos urbanos*" que participa en el XXV Congreso Nacional de ingeniería Mecánica en la ciudad de Santander.



8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] R. NAVARRO SALAS , D. SEPÚLVEDA GARCÍA, R. RODRÍGUEZ FIGUEROA y G. D. V. DÍAZ MUÑOZ, «*Vibraciones mecánicas 4ta Ed*», México: Pearson Educación (2010).
- [2] D. BEBEN, T. MALESKA, P. BOBBRA, J. DUDA y W. ANIGACZ, «*Influence of Traffic-Induced Vibrations on Humans and Residential Building—A Case Study*» International Journal of Environmental Research and Public Health, 19(9), 5441 (2022).
- [3] M. CRISPINO y . M. D'APUZZO, «*Traffic-Induced Vibrations in a Heritage Measurement and Prediction of Traffic-Induced Vibrations in a Heritage Building*» Journal of Sound and vibration, 246 (2), 319-335 (2001).
- [4] R. NAVARRO SALAS , D. SEPÚLVEDA GARCÍA, R. RODRÍGUEZ FIGUEROA y G. D. V. DÍAZ MUÑOZ, «*Vibraciones mecánicas 5ta Ed*», México: Pearson Educación (2012).
- [5] J. M. DE JUANA, «*Física General 5da Ed*», Madrid: Pearson Educación (2003).
- [6] A. J.-G. JAKUBCZYK-GALCZNSKA y R. JANKOWSKI, «*Traffic-Induced Vibrations. The Impact on Buildings and People*» The 9th International Conference “Environmental Engineering”, Vilnius, Lithuania (2014).
- [7] J. KAWECKI y A. KOWALSKA, «*Analysis of Vibration Influence on People in Buildings in Standards Approach*» WIT Transactions on Ecology and The Environment, Vol 148 (2011).
- [8] R. HOSTETTLER, «*Traffic Counting Using Measurements of Road Surface Vibrations*» Master Thesis, Department of Computer and Electrical Engineering Division of Systems and Interaction, Luleå University of Technology (2009).

- [9] K. LEUVEN, G. DEGRANDE «*Wave Propagation in the Soil: Theoretical Background and Application to Traffic Induced Vibrations.*» Department of Civil Engineering, Kasteelpark Arenberg 40, B-3001 Heverlee, Belgium.
- [10] P. CLEMENTE y D. RINALDIS, «*Protection of a Monumental Building Against Traffic-Induced Vibrations*» *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 17 289-296 (1998).
- [11] J. J.HAJEK, C. T.BLANEY y D. K.HEIN, «*Mitigation of Highway Traffic-Induced Vibration*» Annual Conference of the Transportation Association of Canada Charlottetown, Prince Edward Island (2006).
- [12] H. XIA, Y. CAO, G. DE ROECK y G. DEGRANDE, «*Environmental Problems of Vibrations Induced by Railway Traffic*» *Civil Engineering China*, 1(2): 142–152 (2007).
- [13] M. SEYEDI, «*Impact of Train-Induced Vibrations on Residents' Comfort and Structural Damages in Buildings*» *Journal of Vibration Engineering & Technologies* (2024).
- [14] A. KOWALSKA-KOCZWARA, F. PACHLA y K. NERING, «*Environmental Protection Against Noise and Vibration*» IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, Cracow University of Technology, Warszawska 24 St., 31-155 Cracow, Poland (2021).
- [15] D. MAGLIACANO, M. VISCARDI, I. DIMINO y A. CONCILIO, «*Active Vibration Control by Piezoceramic Actuators of a Car Floor Panel*» 23rd International Congress on Sound and Vibration, Athènes, Greece (2016).
- [16] S. LING, F. YU, D. SUN, G. SUN y L. XU, «*A Comprehensive Review of Tire-Pavement Noise: Generation Mechanism, Measurement Methods, and Quiet Asphalt Pavement*» *Journal of Cleaner Production* (2020).

- [17] F. RICHART, J. HALL y R. WOODS, «Vibrations of Soils and Foundations» Department of Civil Engineering, University of Michigan (1970).
- [18] Z. ZAREI, J SADEGHI, A SARKAR, «*Evaluation of heavy-vehicle-induced vibrations running on asphalt pavements*» Journal of Construction and Building Materials, 358 1293992022 (2022).
- [19] J.RIVAS, R.WUNDERLICH, S J.HEINEN, «*Road Vibrations as a Source to Detect the Presence and Speed of Vehicles*» IEEE Sensors Journal Volumen 17, Nº 2 (2017).
- [20] M. MAHANNA, M. SADEK, I. SHAHROUR, «*Numerical modeling of traffic-induced ground vibration*» Journal of Computers and Geotechnics (39) 116–123 (2012).
- [21] J. LAN, T. LAN, S. NAHAVANDI, «*A Novel Application of a Microaccelerometer for Target Classification*» IEEE Sensors Journal, Volumen 4, Nº 4 (2004).
- [22] D. KLEYKO, W. BIRK, N. LYAMIN, U. WIKLUND, «*Vehicle Classification using Road Side Sensors and Feature-free Data Smashing Approach*» Conference Paper (2016).
- [23] X. BIAN, C. CHAO, W. JIN, Y. CHEN, «*A 2,5D finite element approach for predicting ground vibrations generated by vertical track irregularities*» Journal of Zhejiang University-Science (Applied Physics & Engineering), 12 (12) 885-894 (2011).
- [24] X. BIAN, Y. CHEN, T. HU, «*Numerical simulation of high-speed train induced ground vibrations using 2,5D finite element approach*» Journal of Science in China Series G: Physics (Mechanics & Astronomy), Volumen 51, Nº 6 632-650 (2008).
- [25] P. HOROWITZ, W. HILL, «*The Art of Electronics, 3ra Ed*» Cambridge, U.K, Cambridge University Press (2015).

- [26] G. A DIAZ LUNA, «*Diseño, Desarrollo y Evaluación de un Acelerómetro Uniaxial*» Trabajo de fin de Grado, Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas (2018).
- [27] D. A. PERNIA MÁRQUEZ, «*Introducción a la medida de Vibración*» Postgrado en Automatización e Instrumentación, Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela (2004).
- [28] «*National Instruments, Operating Instructions and Specifications*» NI 9233, 4-Channel, ± 5 V, 24-Bit IEPE Analog Input Module, National Instruments (2008).
- [29] Generalitat Valenciana, «*Normativa de Firmes de la Comunidad Valenciana*» Conselleria de Infraestructuras y Transporte, Valencia, España (2023).
- [30] Gobierno de España, «*Real Decreto 1367/2007*», de 19 de octubre, por el que se desarrolla la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido. Boletín Oficial del Estado (BOE), Nº 254, 23 octubre (2007).
- [31] J. O UMAÑA «*Vibraciones generadas por tráfico*» Trabajo experimental, Montevideo, Uruguay (2025).
- [32] J.PARK, S.CHOI, H.JUNG «*Measurement and Analysis of Vibration Levels for Truck Transport Environment in Korea*» *Applied Sciences* 10, 6754 (2020).
- [33] J SINGH, E JONESON «*Measurement and Analysis of US Truck Vibration for Leaf Spring and Air Ride Suspensions, and Development of Tests to Simulate these Conditions*» *Packaging Technology and Science* (19) 309–323 (2006).
- [34] M. MARTINEZ, P SINGH «*Measurement and Analysis of Vibration Levels for truck transport in Spain as a function of payload, suspension and speed*» *Packaging Technology and Science* (21) 439–451 (2007).
- [35] M. MHANNA, M. SADEK, I. SHAHROUR «*Study of traffic induced ground vibrations using a combined finite difference model*» Conference Paper 20ème Congrès Français de Mécanique, Besançon, France (2011).

- [36] D. PAPAN, Z. PAPANOVA, K. KRKOSKOVA «*Experimental dynamic analysis of traffic seismicity effect on historical building*» 5th International Scientific Conference on Civil Engineering-Infrastructure-Mining (2019).



9. WEBGRAFÍA

- [I] Página web Piezotronics: <https://www.directindustry.es/prod/pcb-piezotronics-gmbh/product-111589-2541265.html>
- [II] Página web de LabView [es/shop/product/labview.htmlsrsltid=A-fmBOooP36SpojEGDLaGR_sy8Uy2IV9mhL7Lfwda_B1fQxI6O67IqgLF](https://www.ni.com/es/shop/product/labview.htmlsrsltid=AfmBOooP36SpojEGDLaGR_sy8Uy2IV9mhL7Lfwda_B1fQxI6O67IqgLF)
- [III] Página web de COMSOL Multiphysics :https://doc.comsol.com/5.5/doc/comsol.help.aco/aco_ug_pressure.05.106.html



10. ANEXOS

10.1. Script de programa en Matlab

Script para el procesamiento de los datos de medidas experimentales y simulaciones para la obtención de gráficas.

```

%% Import the data
[~, ~, raw]
=xlsread('KELME2.xlsx','sheet1','A1:B16000');
raw(cellfun(@(x) ~isempty(x) && isnumeric(x) &&
isnan(x),raw)) = {''};

%% Replace non-numeric cells with NaN
R = cellfun(@(x) ~isnumeric(x) &&
~islogical(x),raw); % Find non-numeric cells
raw(R) = {NaN}; % Replace non-numeric cells

%% Create output variable
Calle14 = reshape([raw{:}],size(raw));

%% Clear temporary variables
clearvars raw R;

%% Definir variables
tfin = 4; % 8 s de tiempo total
FS = 2000; % Frecuencia de muestreo en Hz

t = 0:1/FS:tfin-1/FS; % Vector de tiempo

%% Extraer la zona de interés
% Seleccionamos el rango de tiempo entre 1 y 3.5
segundos
t_Acel_C14 = t(t >= 0 & t <= 4);
Acel_C14 = Calle14(:,2); % Datos de aceleración
r_Acel_C14 = Acel_C14(t >= 0 & t <= 4); % Recortamos
la señal en la zona de interés

%% Graficar solo la zona de interés
figure;
plot(t_Acel_C14, r_Acel_C14)

xlabel('Tiempo [s]')
ylabel('Aceleración [m/s^2]')

```

```

legend({'Aceleración'}, 'Location', 'southwest',
'Orientation', 'vertical')
% Aumentar el tamaño de los números en los ejes
set(gca, 'FontSize', 14); % Puedes ajustar el valor
'14' a lo que necesites

%% Hacer la FFT de la señal recortada

PlotFft(r_Acel_C14, FS)

ylim ([0 0.001])
% Aumentar el tamaño de los números en los ejes
set(gca, 'FontSize', 14); % Puedes ajustar el valor
'14' a lo que necesites

%% Encontrar el valor máximo y su índice
[max_val, idx_max] = max(r_Acel_C14);

%% Obtener el tiempo correspondiente al valor máximo
t_max = t_Acel_C14(idx_max);

%% Mostrar el valor máximo y el tiempo en la gráfica
figure;
plot(t_Acel_C14, r_Acel_C14);
hold on;
plot(t_max, max_val, 'ro', 'MarkerSize', 10,
'DisplayName', 'Punto Máximo') % Marca el punto
máximo
hold off;

xlabel('Tiempo [s]')
ylabel('Aceleración [m/s^2]')
legend({'Aceleración', 'Punto Máximo'}, 'Location',
'southwest', 'Orientation', 'vertical')
% Aumentar el tamaño de los números en los ejes
set(gca, 'FontSize', 14); % Puedes ajustar el valor
'14' a lo que necesites

%% Imprimir el valor y el tiempo máximo en la
consola
fprintf('El valor máximo es %.4f y ocurre en t =
%.4f s.\n', max_val, t_max);

```

```

%% Hacer la FFT de la señal recortada

% Realizamos la FFT de la señal
N = length(r_Acel_C14); % Número de puntos
f = (0:N-1)*(FS/N); % Vector de frecuencias
Y = fft(r_Acel_C14); % FFT de la señal

% Recortar la FFT a 100 Hz
f_limit = 100; % Frecuencia límite en Hz
Y(f > f_limit) = 0; % Poner en 0 las frecuencias
mayores a 100 Hz

% Graficar la FFT recortada
figure;
plot(f(f <= f_limit), abs(Y(f <= f_limit))/N) %
Graficamos solo hasta 100 Hz
xlabel('Frecuencia [Hz]')
ylabel('Aceleración [m/s^2]')
% Aumentar el tamaño de los números en los ejes
set(gca, 'FontSize', 14); % Puedes ajustar el valor
'14' a lo que necesites
    
```

