

4. REDUCCIÓN DE VIBRACIONES MEDIANTE PAD EN DIFERENTES NIVELES.

4.1. INTRODUCCIÓN.

Una vez determinadas las pautas en el comportamiento de los principales parámetros externos de las vibraciones inducidas en el terreno vamos a investigar qué ocurre con las propiedades de los elementos elastoméricos (pad), con la intención de encontrar una combinación que permita reducir las vibraciones de una forma eficaz. Dichas propiedades son rigidez y amortiguamiento.

El análisis se realizará para cada tipo de vía por separado, ya que, como se ha comprobado, cada una tiene unas características física diferentes y un comportamiento para cada frecuencia distinto.

4.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS: RESPUESTA DEL TERRENO EN VÍA BALASTO.

Seguidamente, se muestran los datos relativos a la vía cuyo ancho de la zona de contacto con el terreno es 2.7 m:

Raíles			
Rigidez a flexión	EI_R	1.26e7	Nm^2
Masa por unidad de longitud	m_R	120	kg/m
Taviasas			
Masa por unidad de longitud	m_s	490	kg/m
Balasto			
Rigidez por unidad de longitud	k_b	3.5e8	N/m^2
Masa por unidad de longitud	m_b	1200	kg/m
Factor de amortiguamiento	η_b	1	-
Líneas de amortiguamiento (primera y segunda)			
Rigidez	k_i	3.5e8	N/m^2
Factor de amortiguamiento	η_i	0.15	-
Línea de amortiguamiento final (tercera)			
Rigidez	k_3	37.5e6	N/m^2
Amortiguamiento	D_3	75e3	Ns/m^2

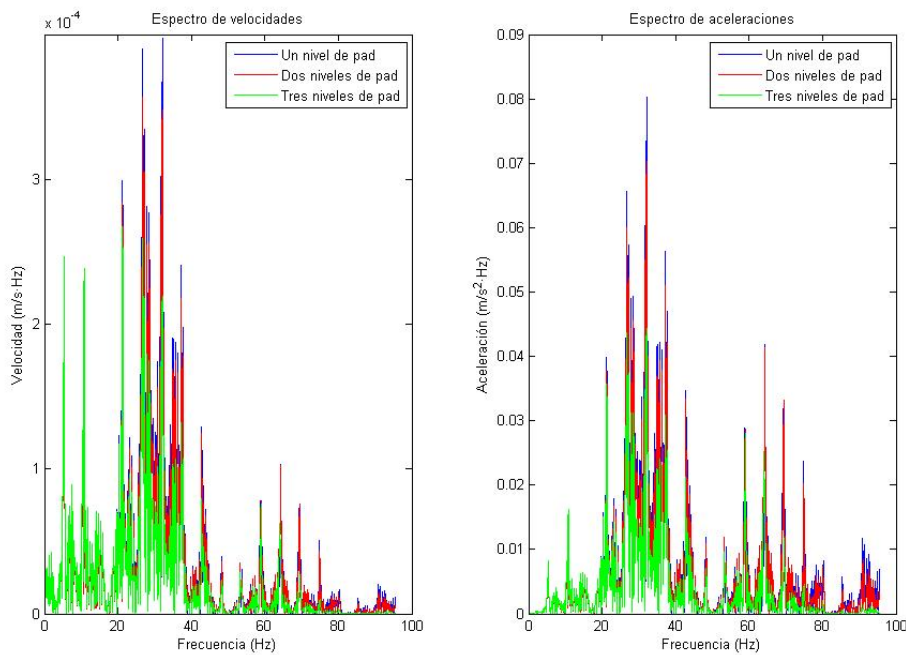
Tabla 4. 1: Propiedades de la vía balasto usadas en el análisis

En cuanto a los parámetros característicos de las líneas de amortiguamiento, se toman los mostrados en la tabla anterior como básicos, y a partir de ellos se considera un rango de variación de $\pm 20\%$ para realizar el estudio que se desarrolla en los siguientes apartados.

Para todas las configuraciones siguientes se considera una carga tipo tren viajando a 100 m/s, y tomando las medidas a una distancia de 20 m del foco, sobre terreno estratificado.

4.2.1. Análisis previo: influencia de los niveles de pad.

A continuación se muestra la influencia de disponer diferentes niveles de amortiguamiento, manteniendo los demás parámetros invariables. Se observan las diferentes respuestas del terreno según consideremos uno (entre raíl y traviesa), dos (raíl-traviesa y traviesa-vía) o tres niveles bajo las condiciones de ensayo citadas anteriormente.



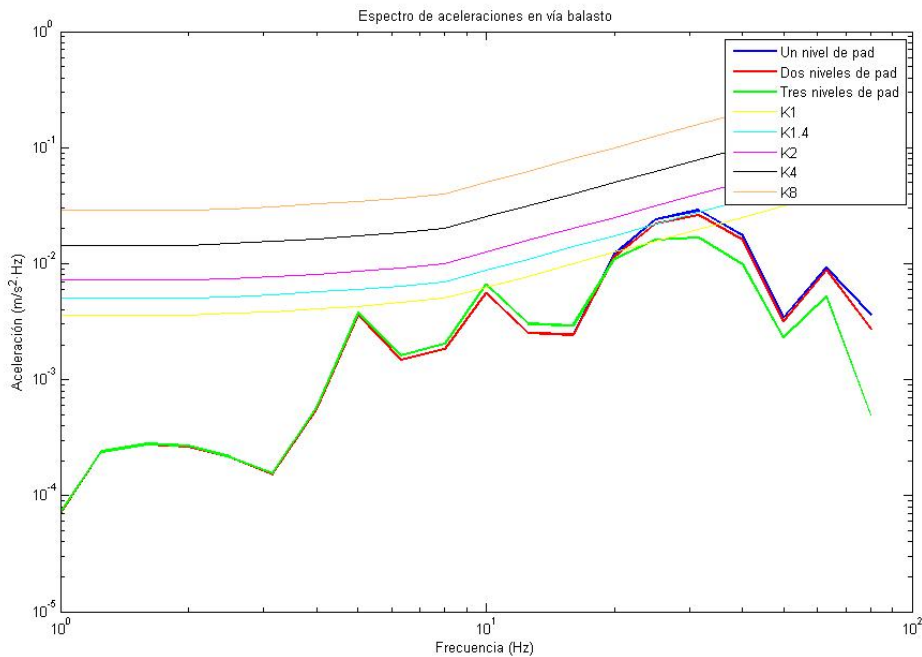


Figura 4. 1: Espectros de velocidades y aceleraciones verticales del terreno estratificado en vía balasto para distintos niveles de pad y espectro de aceleración en escala de tercio de octavas junto con las limitaciones impuestas con la normativa

Se aprecia una diferencia de comportamiento del terreno dependiendo de la frecuencia de interés:

- Para frecuencias inferiores a 5 Hz, la inclusión de más niveles de amortiguamiento no afecta en absoluto a la respuesta.
- En el tramo de frecuencias comprendidas entre 5 Hz y 20 Hz, hay un pequeño cambio en el comportamiento de las ondas ya que el valor eficaz de la aceleración en el caso de disponer de tres niveles de pad queda ligeramente por encima de los otros casos.
- A partir de 20 Hz el empleo de tres niveles de amortiguamiento mejora algo la respuesta del terreno, sin embargo, sigue sin haber apenas diferencias entre tener uno o dos niveles de pad.

Por lo tanto, dependiendo de la frecuencia de interés se debe elegir una opción u otra. Es decir, para frecuencias menores de 20 Hz no estaría justificada la elección de tres niveles de pad ya que la reducción de vibraciones no es significativa. Sin embargo, el comportamiento cambia a partir de ahí, encontrando su beneficio mayor en el tramo de frecuencias comprendidas entre 20 y 40 Hz ya que supone no bajar del límite K1.4 a K1.

Para completar el estudio, en los siguientes apartados se analiza con más detalles la influencia de la variación de la rigidez y del amortiguamiento.

4.2.2. Influencia de la rigidez.

Para analizar la influencia que ejerce la rigidez en la reducción de vibraciones se van a realizar varias combinaciones alternando dicha variación con la consideración de distintos niveles de pad.

En primer lugar, se considera la existencia de una única línea de pad y se estudia el comportamiento de las vibraciones cuando se modifica la rigidez en dicha línea, incrementando y reduciendo en un 20% el valor básico definido en la tabla de propiedades expuesta al comienzo del apartado.

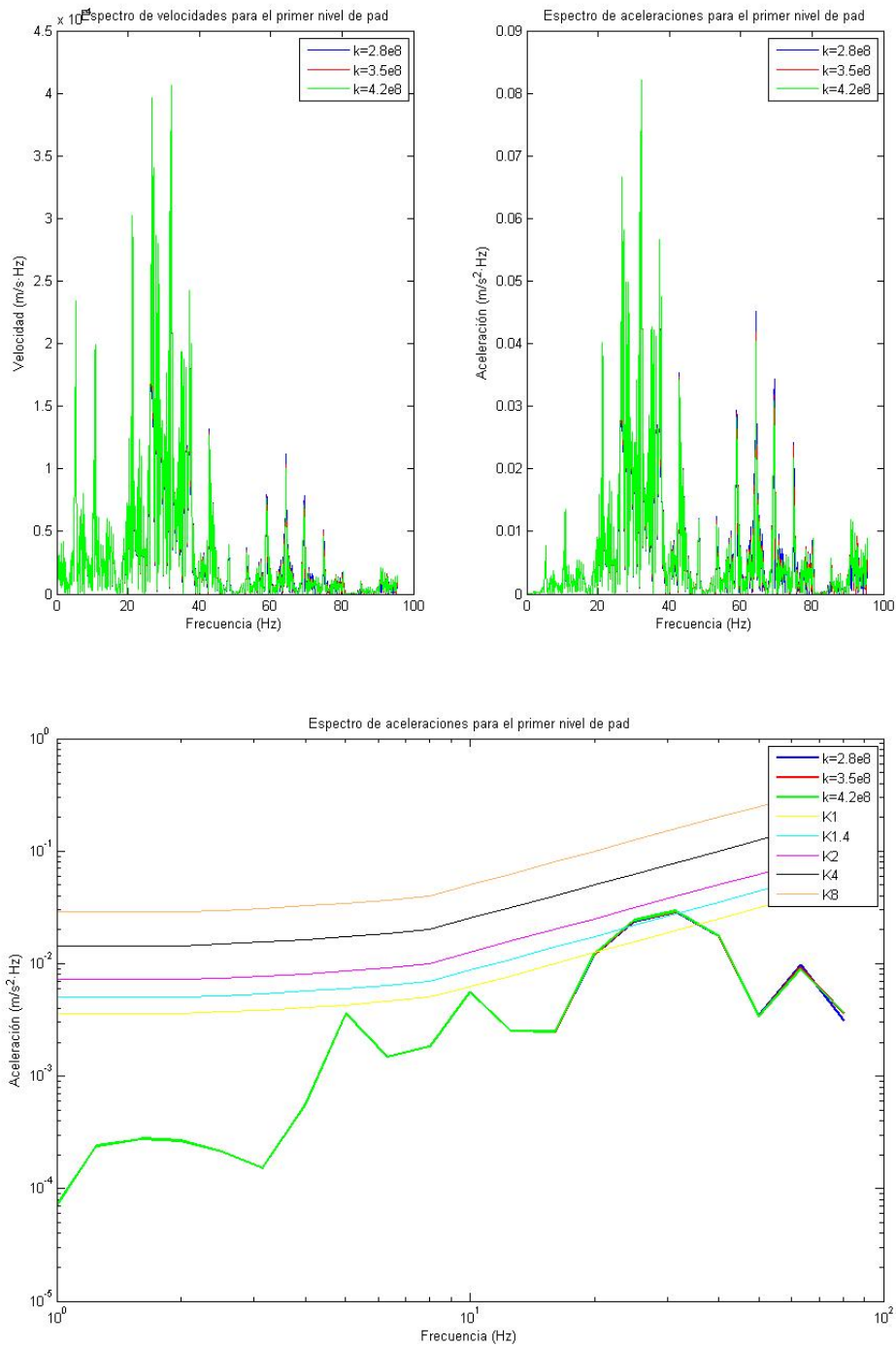
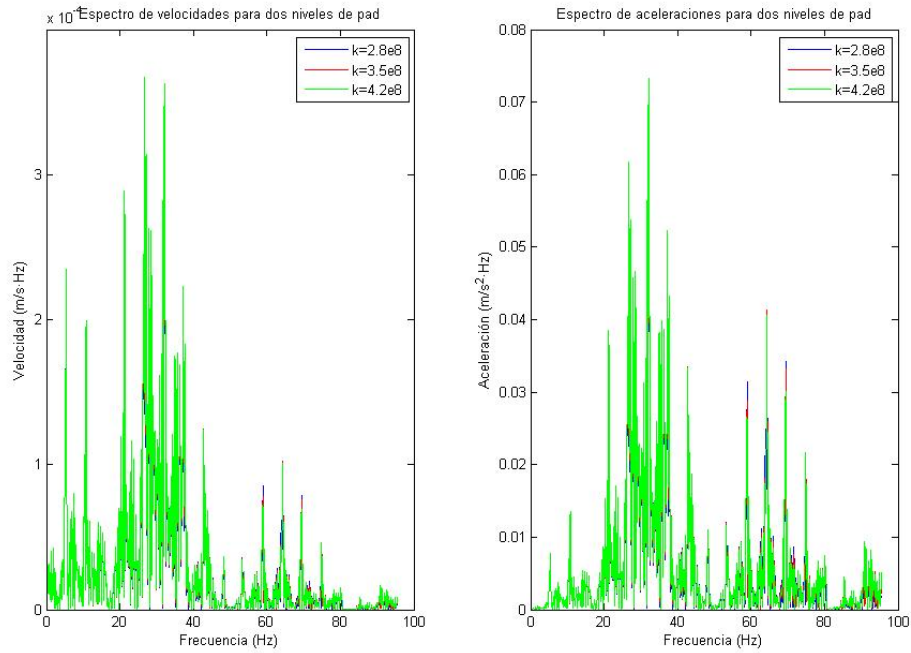


Figura 4. 2: Espectros de velocidades y aceleraciones verticales del terreno estratificado en vía balasto para un nivel de pad ante variaciones en la rigidez y espectro de aceleraciones en escala de tercio de octavas junto con las limitaciones impuestas con la normativa

A continuación, se estudia el mismo caso pero se añade una segunda línea de pad y se modifican a la vez las rigideces de ambos niveles.



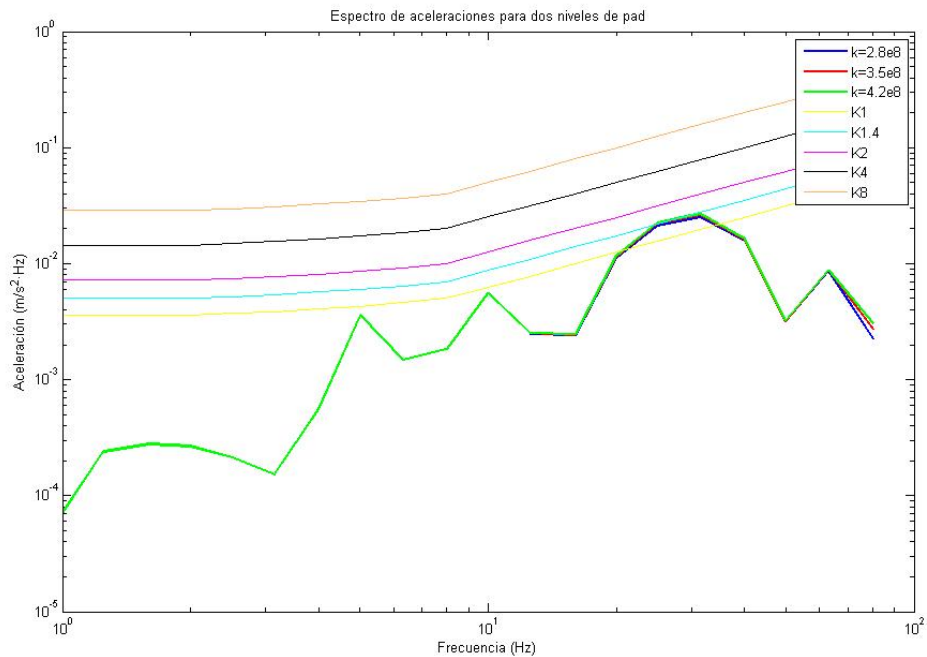


Figura 4. 3: Espectros de velocidades y aceleraciones verticales del terreno estratificado en vía balasto para dos niveles de pad ante variaciones en la rigidez y espectro de aceleraciones en escala de tercio de octavas junto con las limitaciones impuestas con la normativa

La tercera de las iteraciones supone tres niveles de pad pero la variación de la rigidez es en los dos primeros niveles. Con ello se pretende observar si la inclusión de un tercer nivel afecta positivamente a la variación de las rigideces anteriores, antes de comprobar si su valor es trascendental.

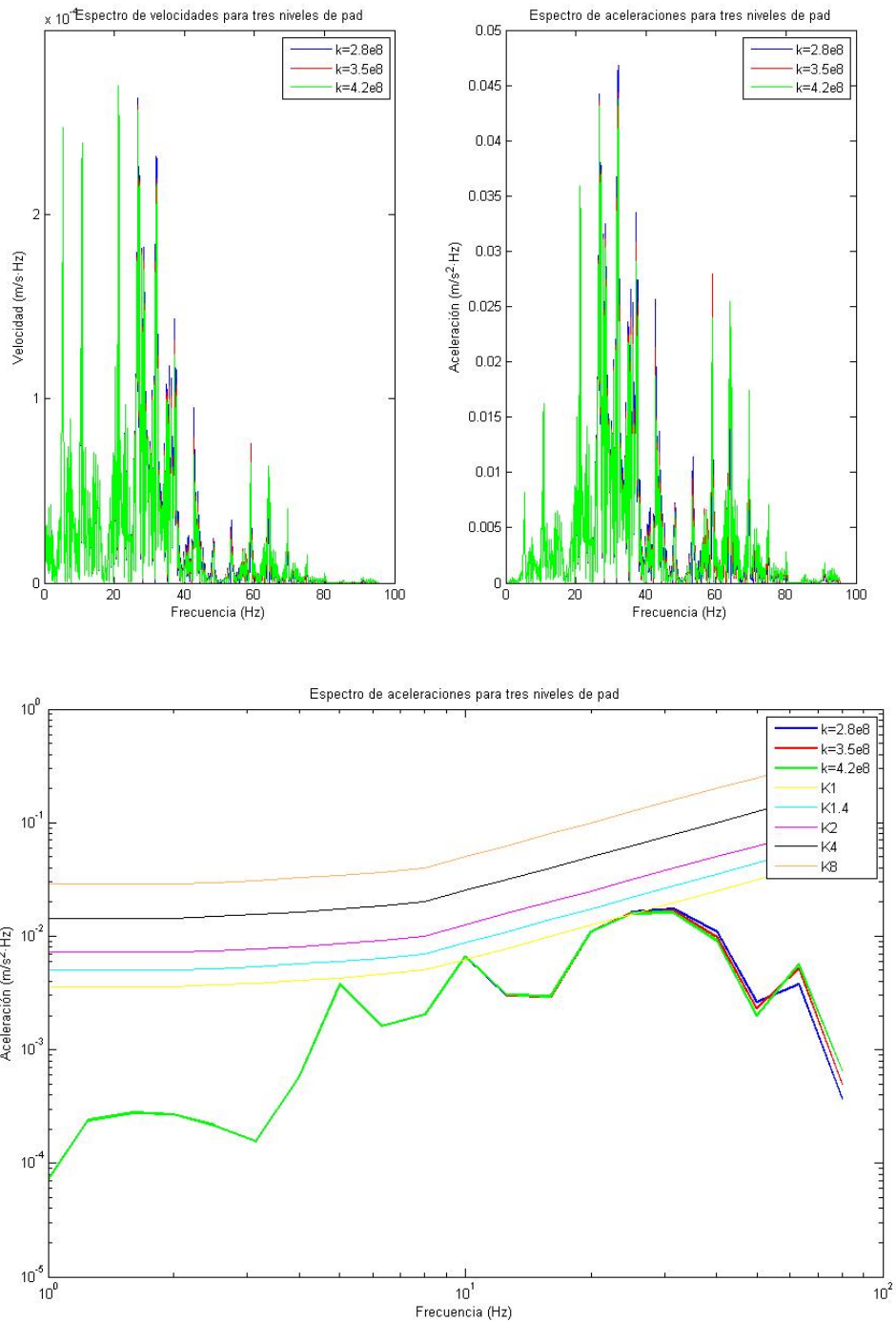


Figura 4. 4: Espectros de velocidades y aceleraciones verticales del terreno estratificado en vía balasto para tres niveles de pad ante variaciones en la rigidez de los dos primeros y espectro de aceleraciones en escala de tercio de octavas junto con las limitaciones impuestas con la normativa

Como conclusiones a estas primeras pruebas podemos asegurar que la modificación de la rigidez considerando uno y/o dos niveles de pad no conducen a ninguna mejora en la reducción de vibraciones, de hecho, no hay diferencias apreciables entre disponer un nivel de pad con una rigidez baja y dos niveles de pad con una rigidez alta.

Además, el tercero de los casos anteriores, aunque muestra una pequeña variación en los resultados para una rigidez baja, no son importantes, ya que en el rango donde se producen está por debajo del límite más bajo impuesto por la normativa. Así que se desprecia el efecto de reducción de vibraciones cuando se modifica la rigidez de los dos primeros niveles de pad.

Debido a que ha sido en el último caso estudiado (figura 4.4) donde se ha encontrado una leve variación en la reducción de vibraciones, se llega al siguiente análisis con el que se pretende estudiar el efecto que produce la variación de la rigidez en el tercer nivel de pad, manteniendo el resto de parámetros constantes.

Dicha variación es, al igual que en los otros casos, consecuencia del aumento y disminución de la medida básica un 20%.

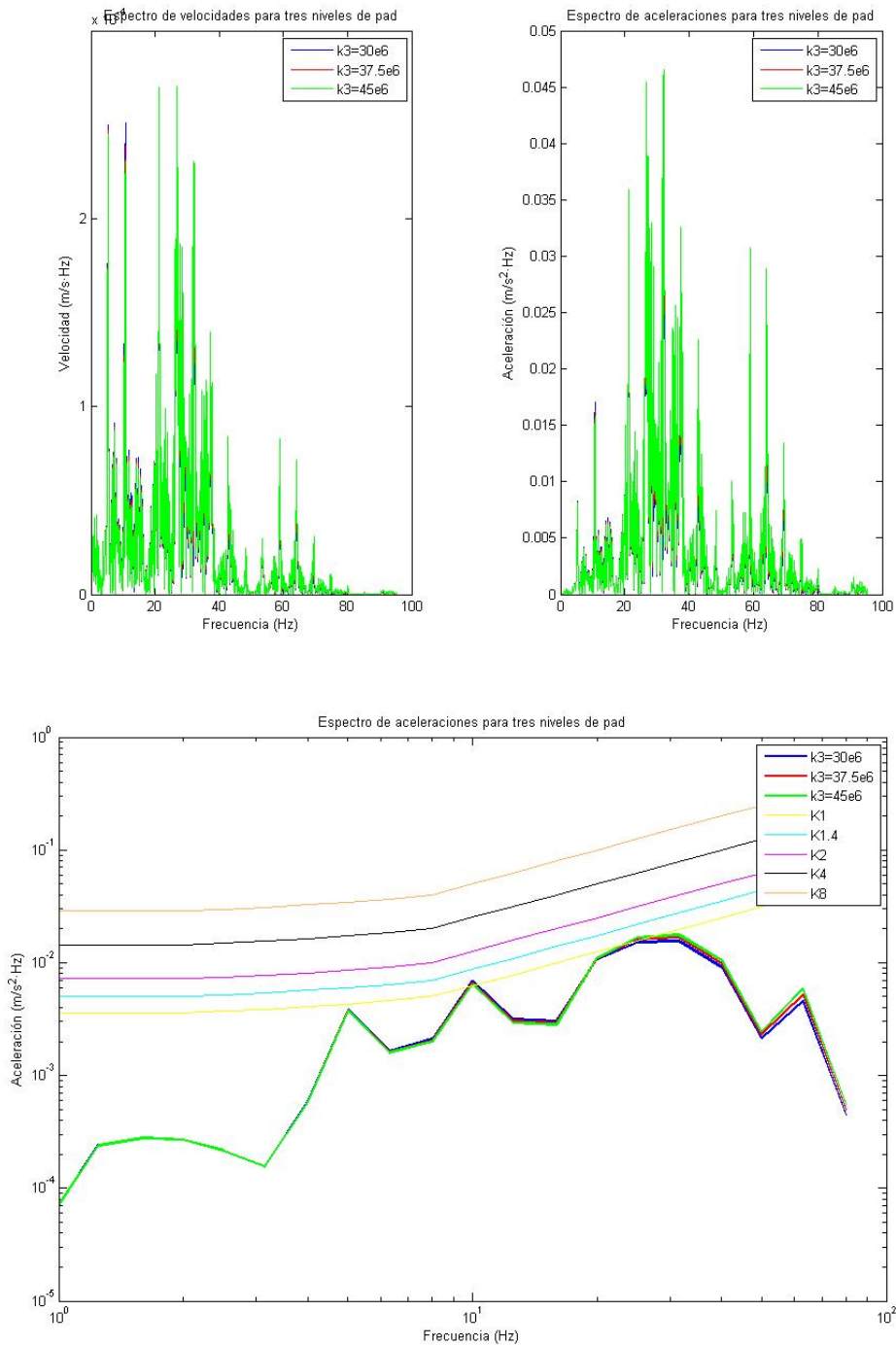
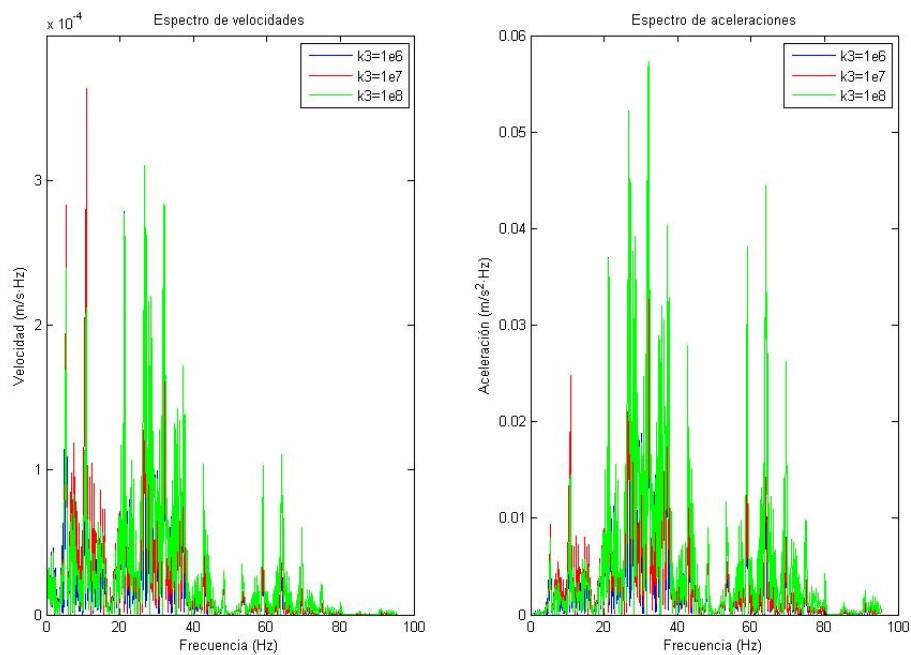


Figura 4. 5: Espectros de velocidades y aceleraciones verticales del terreno estratificado en vía balasto para tres niveles de pad ante variaciones en la rigidez del último nivel y espectro de aceleraciones en escala de tercio de octavas junto con las limitaciones impuestas con la normativa

Como se aprecia en las figuras anteriores, no hay cambios notorios en el terreno cuando se varía este parámetro, por lo que hacer más o menos flexible la tercera capa no colabora en la reducción de vibraciones.

Para completar el estudio, se realiza el siguiente ejemplo para comprobar si variando el orden de magnitud se encuentra algún valor que ayude a paliar las vibraciones, o si definitivamente lo primordial es la consideración de todos los niveles de pad sin importar el valor de sus rigideces.



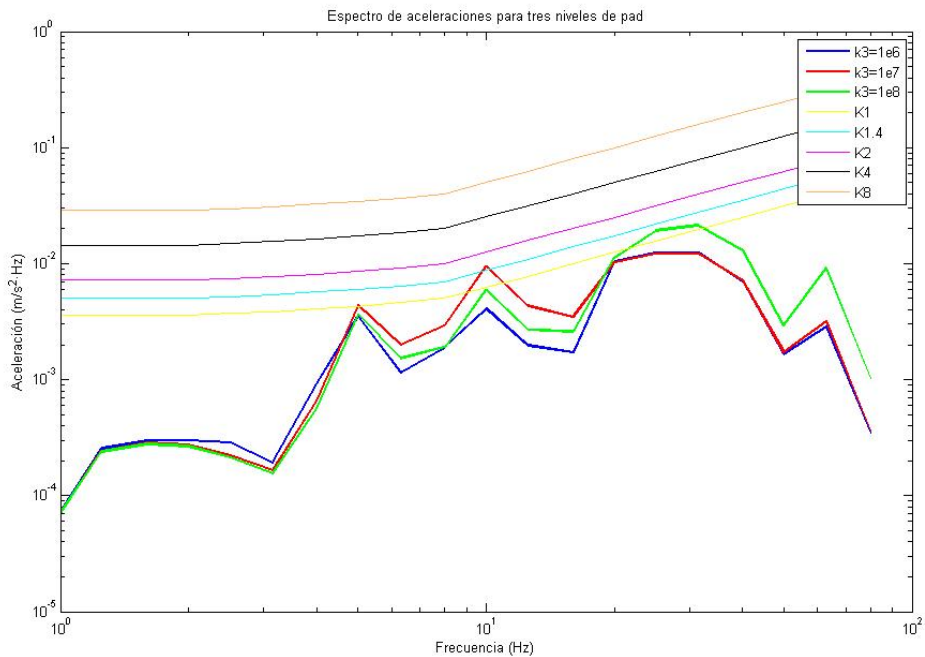


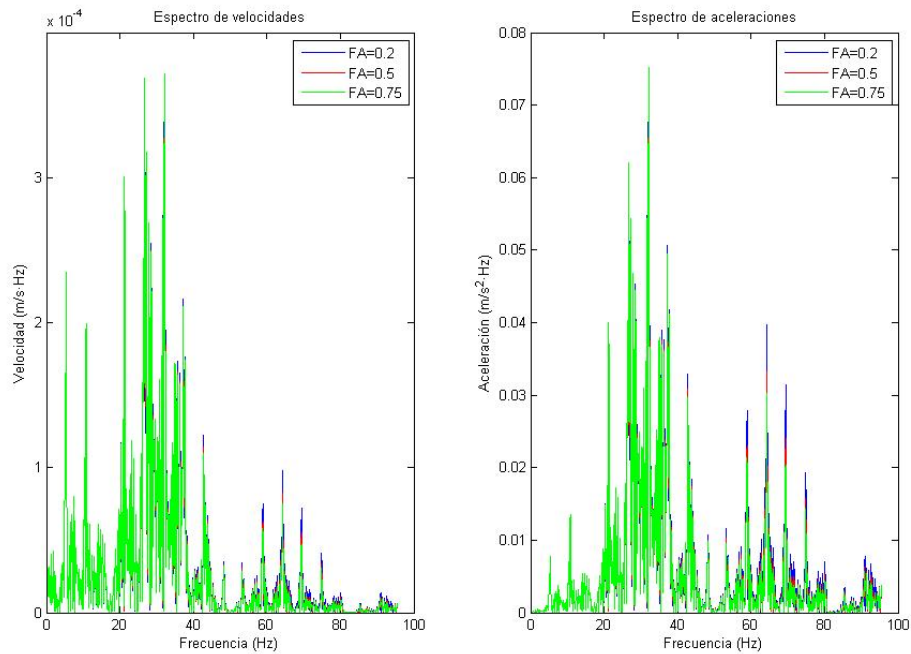
Figura 4. 6: Espectros de velocidades y aceleraciones verticales del terreno estratificado en vía balasto para tres niveles de pad ante variaciones en la rigidez del último nivel y espectro de aceleraciones en escala de tercio de octavas junto con las limitaciones impuestas con la normativa

Al variar un orden de magnitud la rigidez de la última capa de pad sí que se perciben algunos cambios en la respuesta, pero dependiendo del rango de frecuencias en el que nos encontremos se tiene una lectura u otra. Es decir, dependiendo del rango e frecuencias en el que estemos interesados, será más favorable tener unas condiciones de rigidez más flexibles o más rígidas.

4.2.3. Influencia del amortiguamiento.

Una vez analizado el efecto de la rigidez se pasa a estudiar el efecto que el amortiguamiento crea sobre el sistema. En ellos se van añadiendo los niveles de pad progresivamente para localizar el efecto beneficioso más eficazmente, en caso de existir.

Se comienza analizando el efecto de la variación del factor de amortiguamiento cuando se disponen dos niveles de pad, continuando por el mismo ejemplo pero con tres niveles, dejando para el final la variación del amortiguamiento en el tercer nivel de pad (dejando las capas anteriores invariables). Los valores del factor de amortiguamiento con los que se realiza la comparación son 0.2, 0.5 y 0.75.



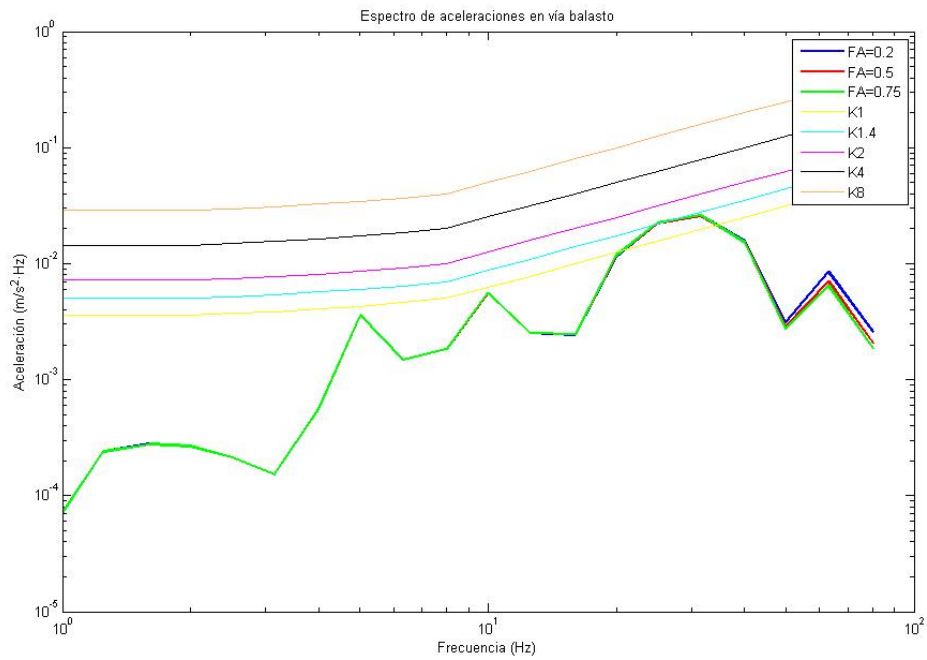


Figura 4. 7: Espectros de velocidades y aceleraciones verticales del terreno estratificado en vía balasto para dos niveles de pad ante variaciones en el factor de amortiguamiento y espectro de aceleraciones en escala de tercio de octavas junto con las limitaciones impuestas con la normativa.

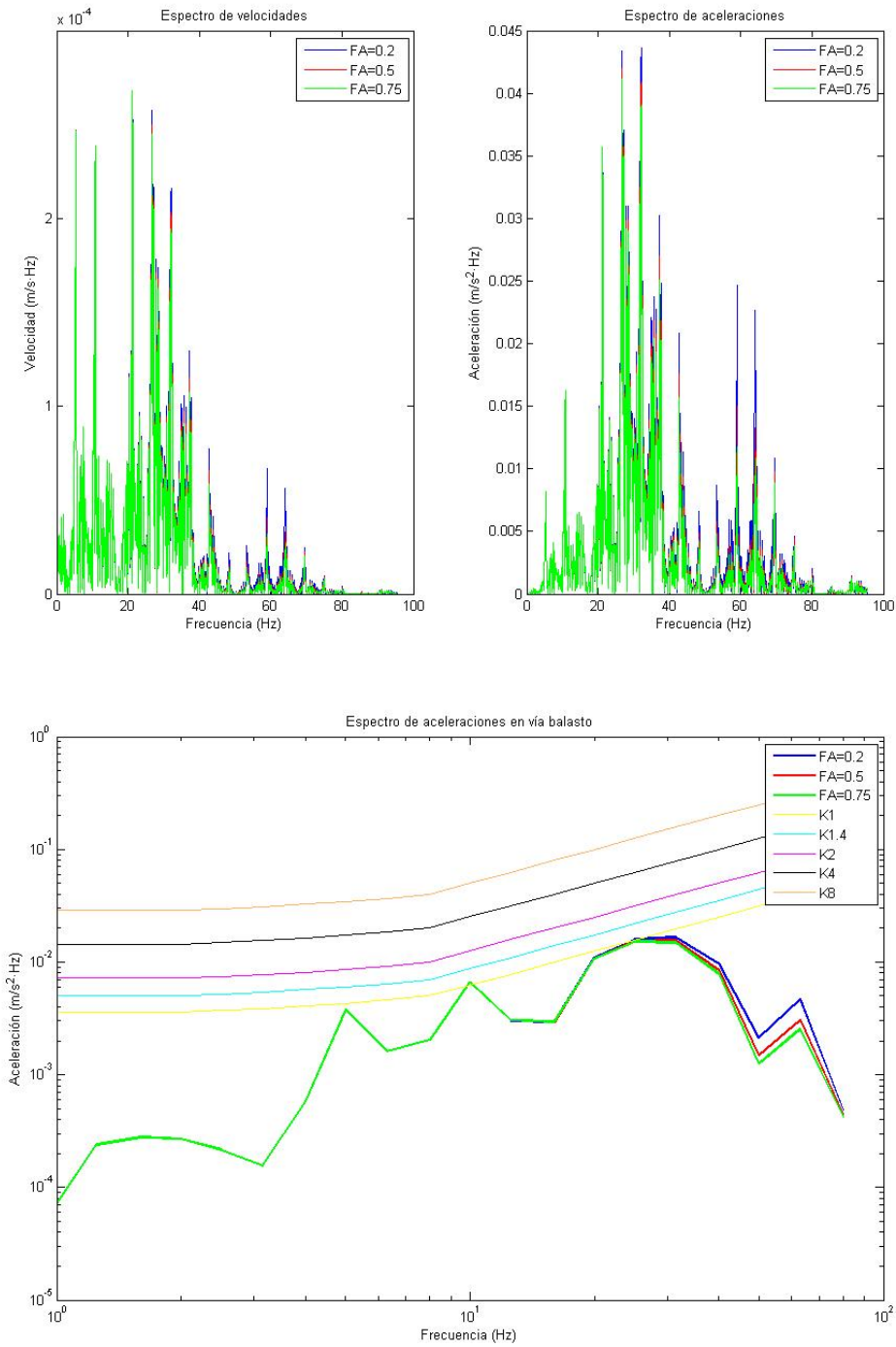


Figura 4. 8: Espectros de velocidades y aceleraciones verticales del terreno estratificado en vía balasto para tres niveles de pad ante variaciones en el factor de amortiguamiento y espectro de aceleraciones en escala de tercio de octavas junto con las limitaciones impuestas con la normativa

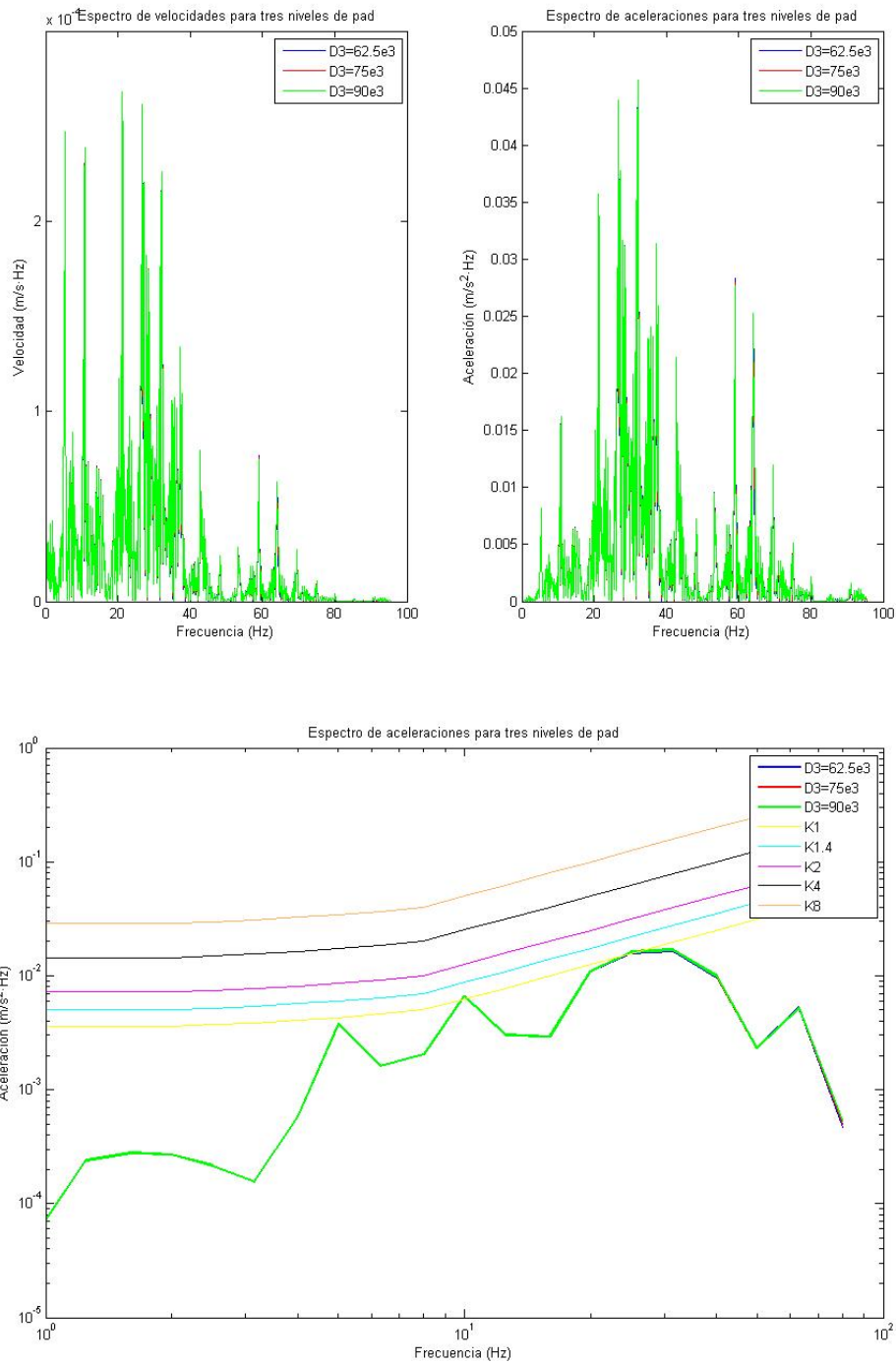


Figura 4. 9: Espectros de velocidades y aceleraciones verticales del terreno estratificado en vía balasto para tres niveles de pad ante variaciones en el amortiguamiento y espectro de aceleraciones en escala de tercio de octavas junto con las limitaciones impuestas con la normativa

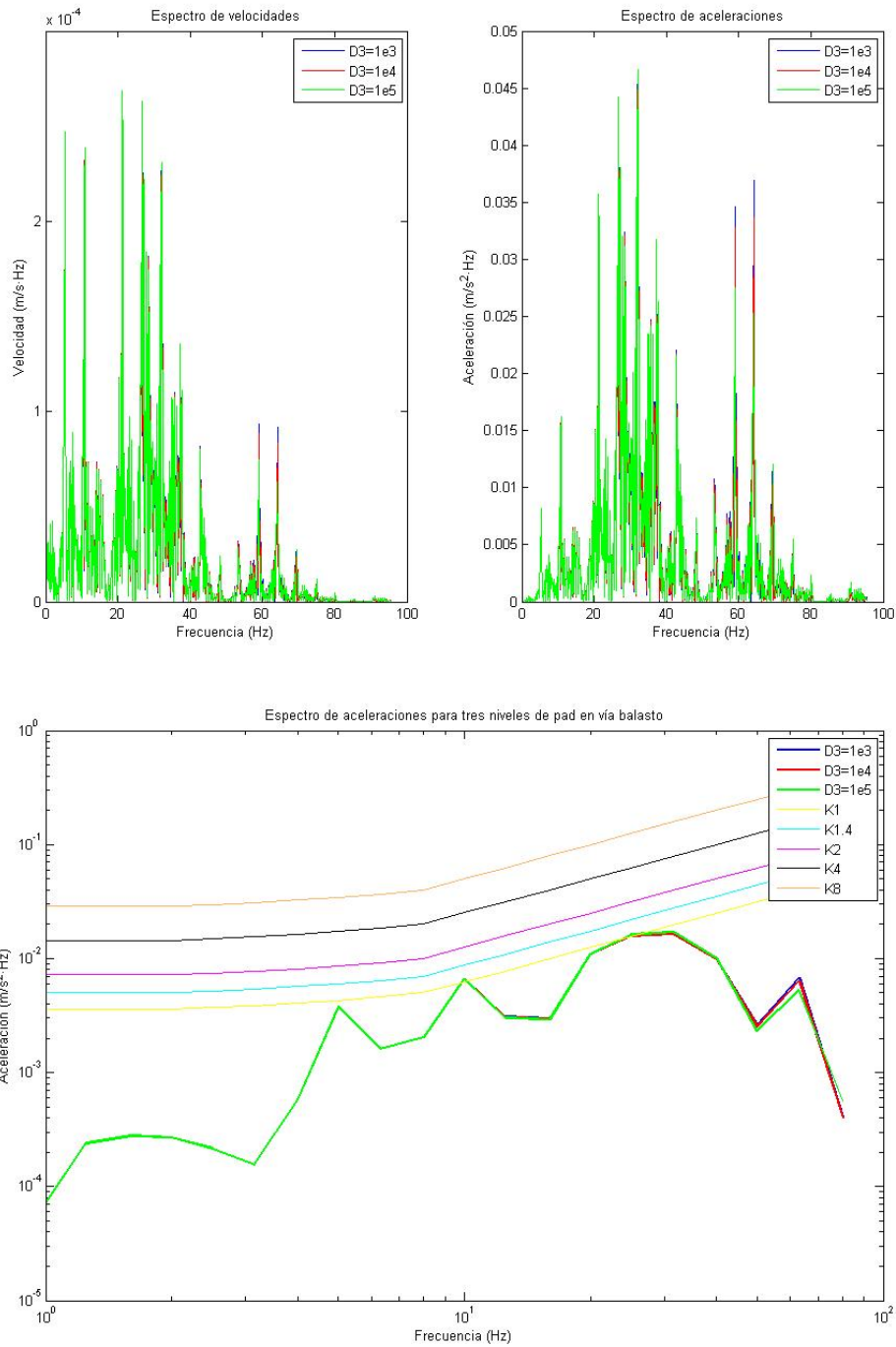


Figura 4. 10: Espectros de velocidades y aceleraciones verticales del terreno estratificado en vía balasto para tres niveles de pad ante variaciones en el orden de magnitud del amortiguamiento y espectro de aceleraciones en escala de tercio de octavas junto con las limitaciones impuestas con la normativa

4.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS: RESPUESTA DEL TERRENO EN VÍA PLACA.

Seguidamente, se muestran los datos relativos a la vía cuyo ancho de la zona de contacto con el terreno es 3.8 m:

Raíles			
Rigidez a flexión	EI_P	6.08e8	Nm^2
Masa por unidad de longitud	m_P	3800	kg/m
Taviasas			
Masa por unidad de longitud	m_s	490	kg/m
Placa			
Rigidez por unidad de longitud	k_P	3.5e8	N/m^2
Masa por unidad de longitud	m_P	1200	kg/m
Factor de amortiguamiento	η_P	0.025	-
Líneas de amortiguamiento (primera y segunda)			
Rigidez	k_i	3.5e8	N/m^2
Factor de amortiguamiento	η_i	0.15	-
Línea de amortiguamiento final (tercera)			
Rigidez	k_3	37.5e6	N/m^2
Amortiguamiento	D_3	75e3	Ns/m^2

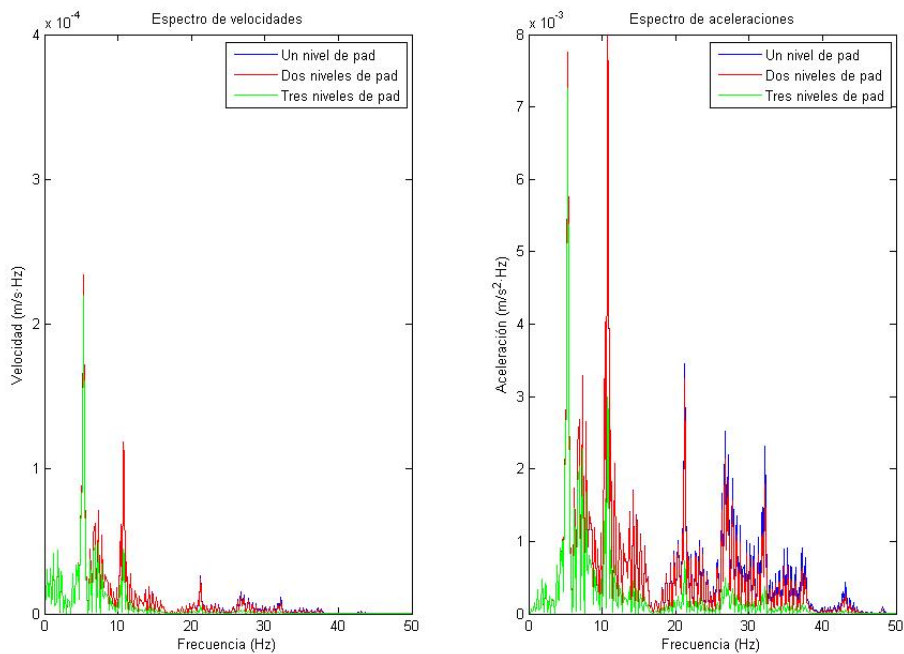
Tabla 4. 2: Propiedades de la vía placa usadas en el análisis

En cuanto a los parámetros característicos de las líneas de amortiguamiento, se toman los mostrados en la tabla anterior como básicos, y a partir de ellos se considera un rango de variación de $\pm 20\%$ para realizar el estudio que se desarrolla en los siguientes apartados.

Para todas las configuraciones siguientes se considera una carga tipo tren viajando a 100 m/s, y tomando las medidas a una distancia de 20 m del foco, sobre terreno estratificado.

4.3.1. Análisis previo: influencia de los niveles de pad.

Para este nuevo modelo en vía placa se van a realizar las mismas comparaciones que en el caso anterior, comenzando por estudiar la influencia de disponer diferentes niveles de amortiguamiento, manteniendo los demás parámetros invariables. Se observan las diferentes respuestas del terreno según consideremos uno (entre raíl y traviesa), dos (raíl-traviesa y traviesa-vía) o tres niveles bajo las condiciones de ensayo citadas en el apartado de datos de la vía.



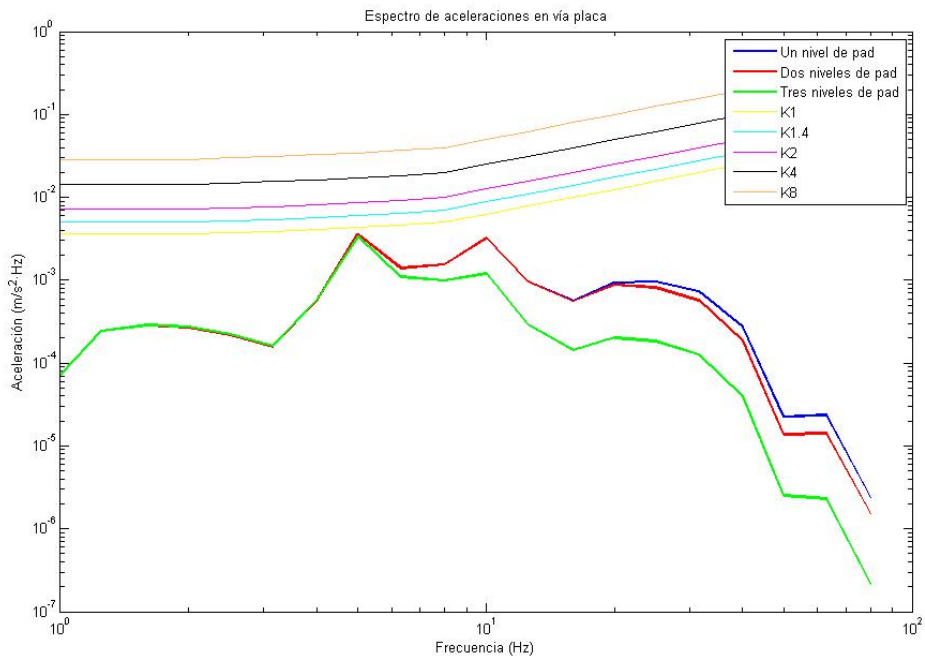


Figura 4. 11: Espectros de velocidades y aceleraciones verticales del terreno estratificado en vía placa para distintos niveles de pad y espectro de aceleración en escala de tercio de octavas junto con las limitaciones impuestas con la normativa

Como puede comprobarse en las figuras anteriores, se aprecia una diferencia de comportamiento del terreno dependiendo del rango de frecuencias:

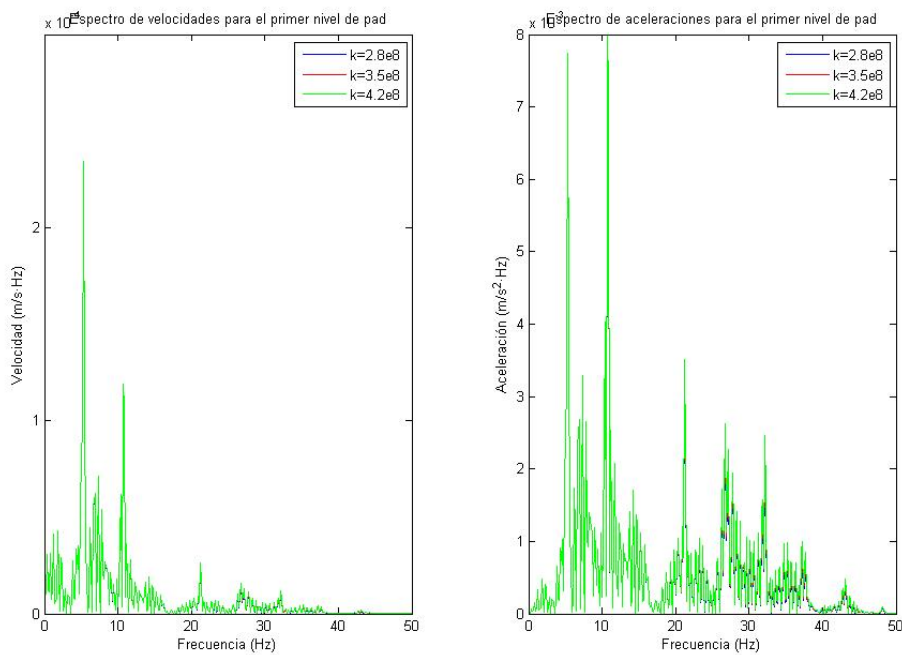
- Para frecuencias inferiores a 5 Hz, la introducción de más niveles de amortiguamiento no afecta en absoluto a la respuesta.
- A partir de 5 Hz el empleo de tres niveles de amortiguamiento mejora bastante la respuesta del terreno, aunque debido a las características del terreno y la vía, todas las vibraciones están por debajo del mínimo que señala la normativa contra la contaminación acústica.

Se completa el estudio analizando la influencia de la variación de la rigidez y del amortiguamiento en cada una de las líneas de pad.

4.3.2. Influencia de la rigidez.

Para analizar la influencia que ejerce la rigidez en la reducción de vibraciones se van a realizar varias combinaciones alternando dicha variación con la consideración de distintos niveles de pad.

Las figuras 4.12, 4.13 y 4.14 muestran los espectros de respuesta considerando la existencia de una, dos y tres líneas de pad respectivamente, estudiando el comportamiento de las vibraciones cuando se modifica la rigidez del nivel de amortiguamiento, incrementando y reduciendo en un 20% el valor básico definido en la tabla 4.2.



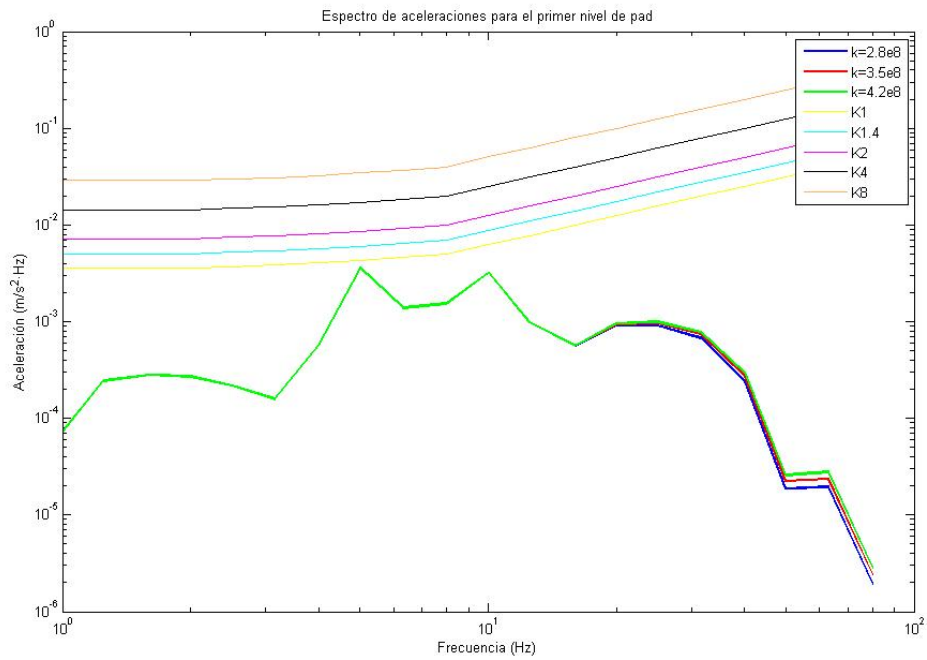
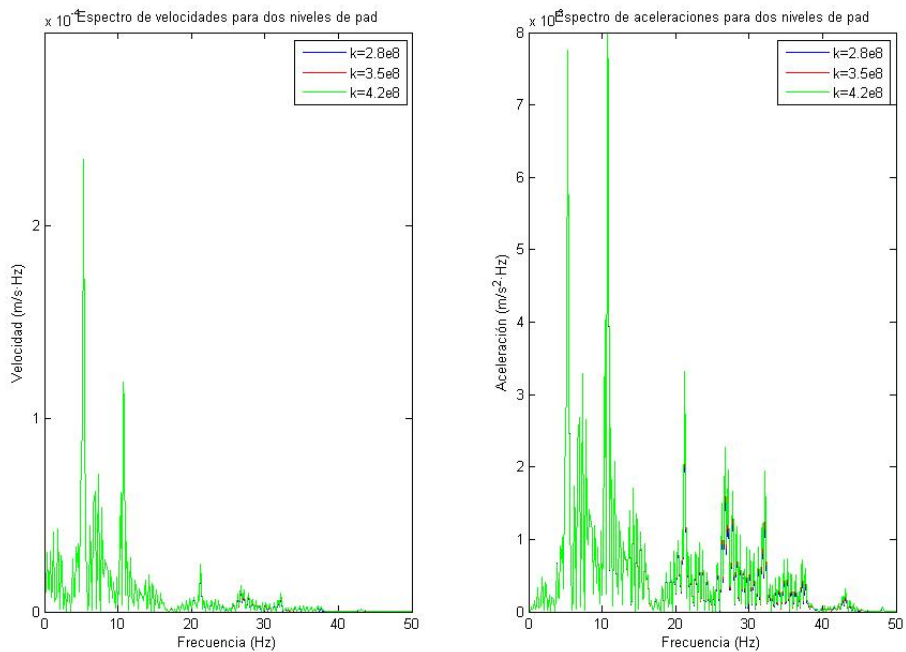


Figura 4. 12: Espectros de velocidades y aceleraciones verticales del terreno estratificado en vía placa para un nivel de pad ante variaciones en la rigidez y espectro de aceleraciones en escala de tercio de octavas junto con las limitaciones impuestas con la normativa



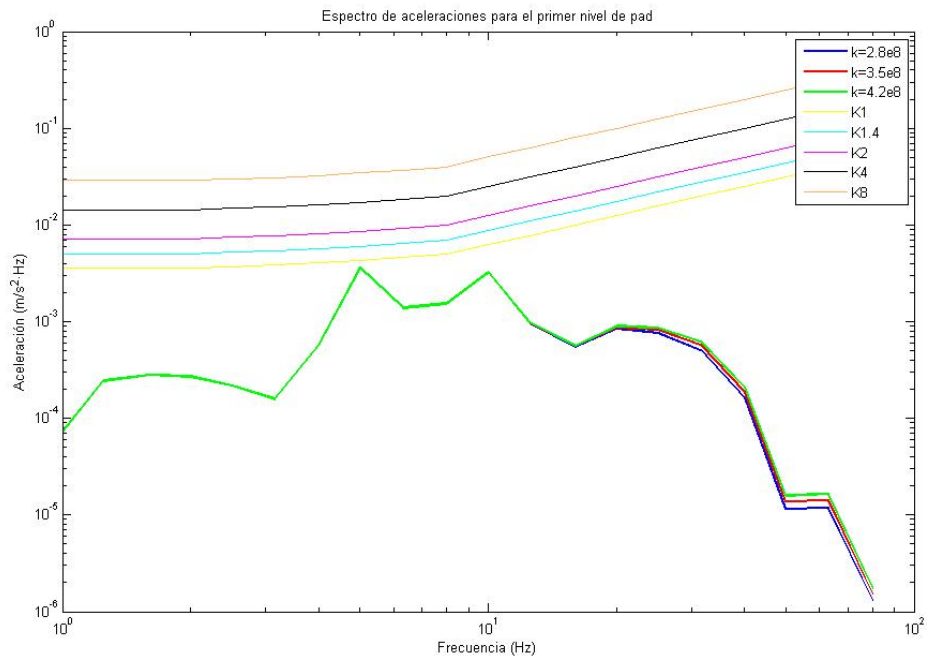
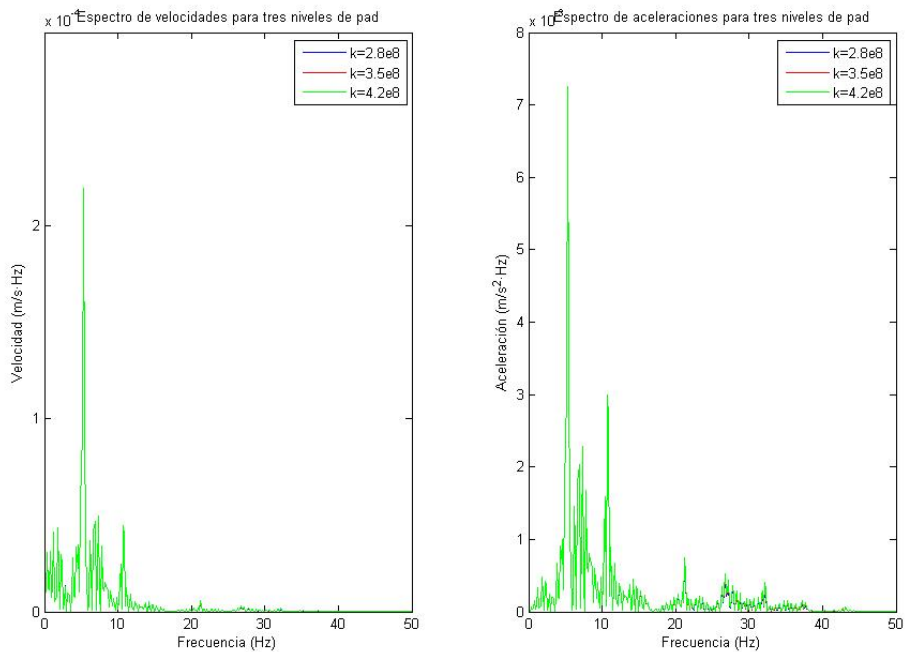


Figura 4. 13: Espectros de velocidades y aceleraciones verticales del terreno estratificado en vía placa para dos niveles de pad ante variaciones en la rigidez y espectro de aceleraciones en escala de tercio de octavas junto con las limitaciones impuestas con la normativa



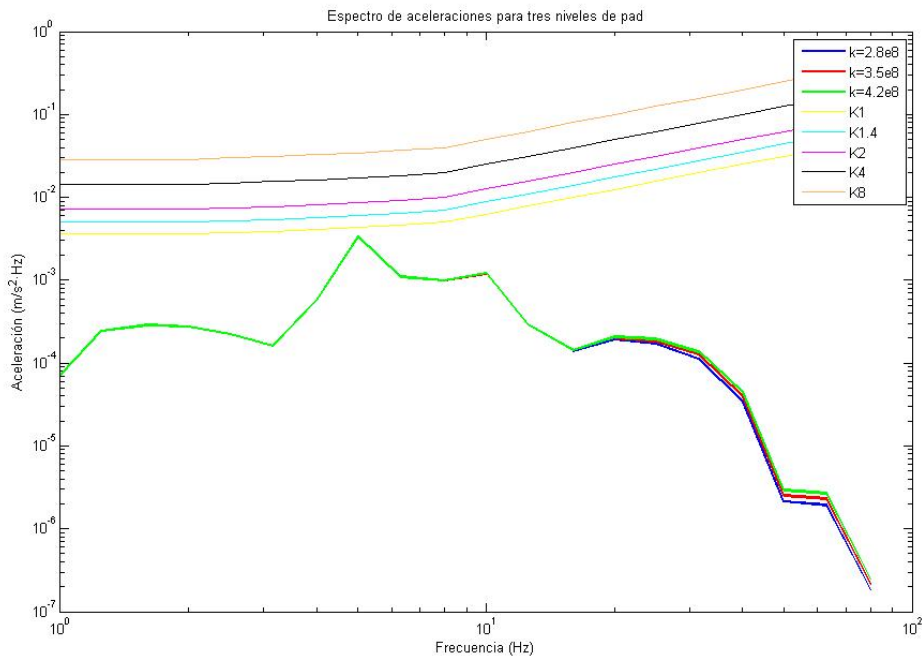


Figura 4. 14: Espectros de velocidades y aceleraciones verticales del terreno estratificado en vía placa para tres niveles de pad ante variaciones en la rigidez de los dos primeros y espectro de aceleraciones en escala de tercio de octavas junto con las limitaciones impuestas con la normativa

Se puede observar en estos tres últimos casos que el comportamiento del terreno es el mismo en todos los casos, ya que responde de igual forma al variar los parámetros en cada ensayo. Debido a que con modificaciones en los primeros niveles de pad no se consigue alterar las vibraciones, se pasa a estudiar cómo afecta en vía placa el cambio en la rigidez del tercer nivel de pad, resultados que se muestran a continuación:

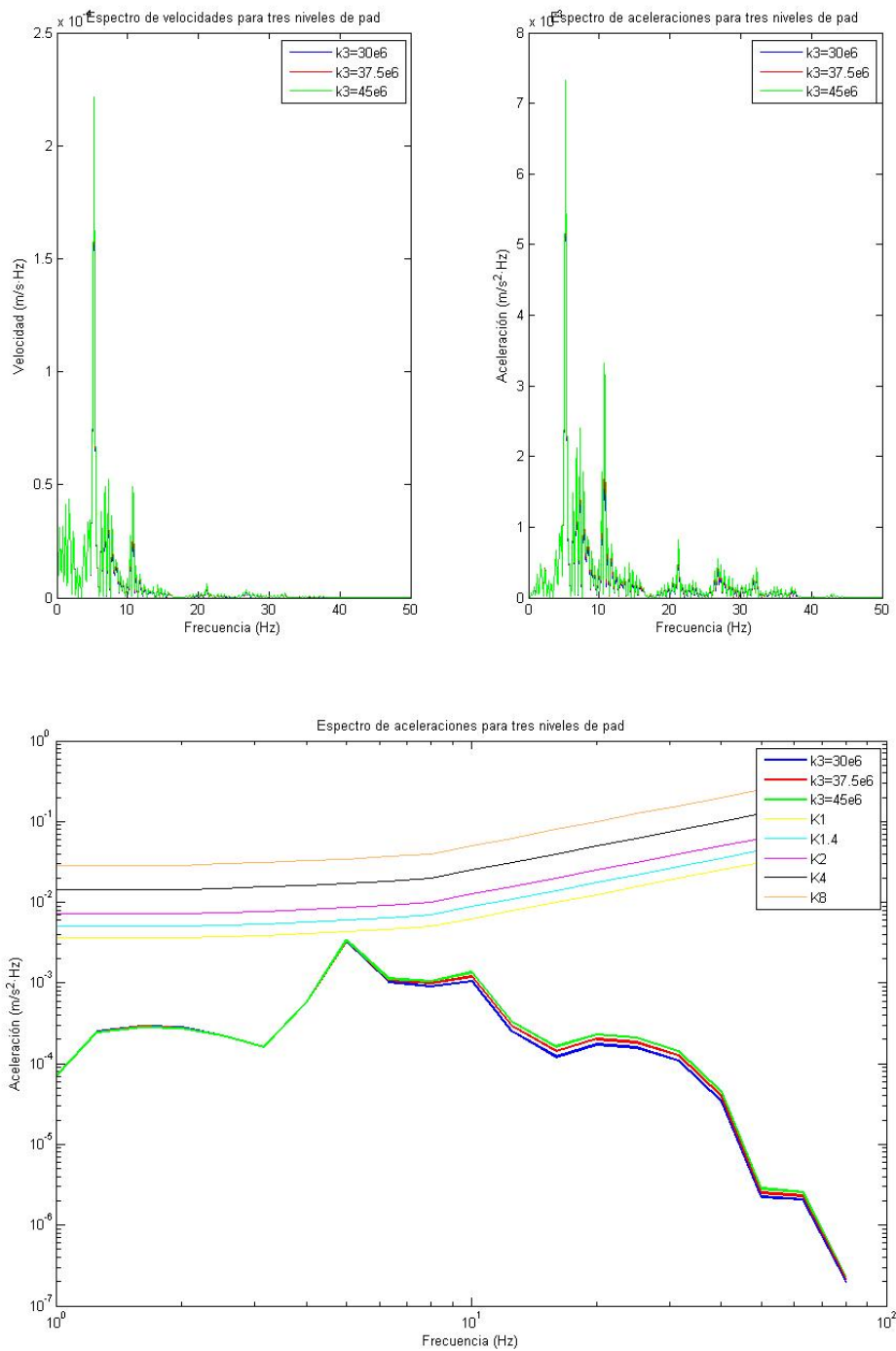
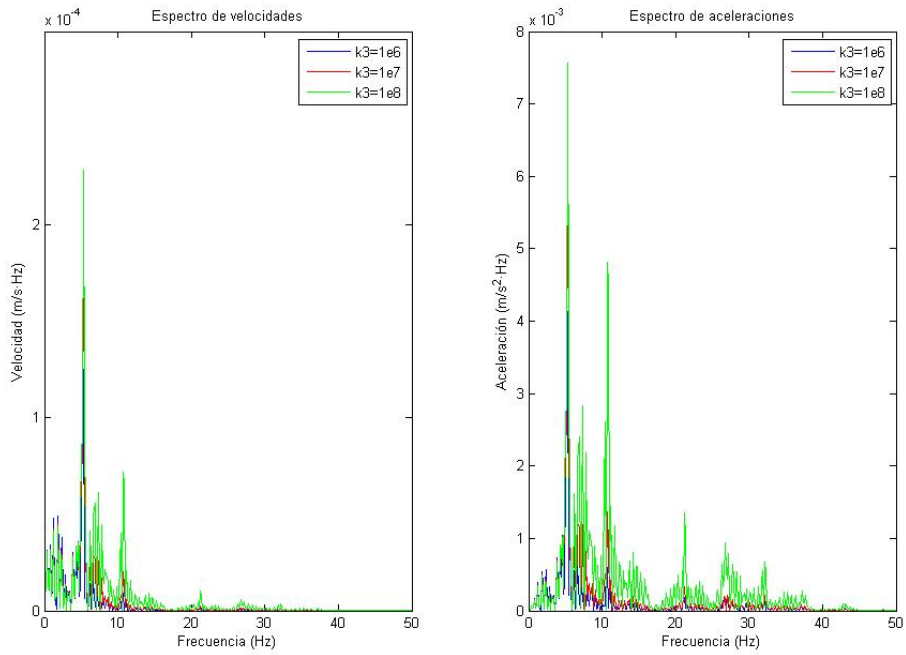


Figura 4. 15: Espectros de velocidades y aceleraciones verticales del terreno estratificado en vía placa para tres niveles de pad ante variaciones en la rigidez del último nivel y espectro de aceleraciones en escala de tercio de octavas junto con las limitaciones impuestas con la normativa

Con una variación del 20% en la rigidez no se encuentran cambios en la respuesta, sin embargo, en la figura que se muestra a continuación se encuentra unas reducciones notables. Estas se producen cuando variamos el orden de magnitud de la rigidez del tercer nivel de pad.



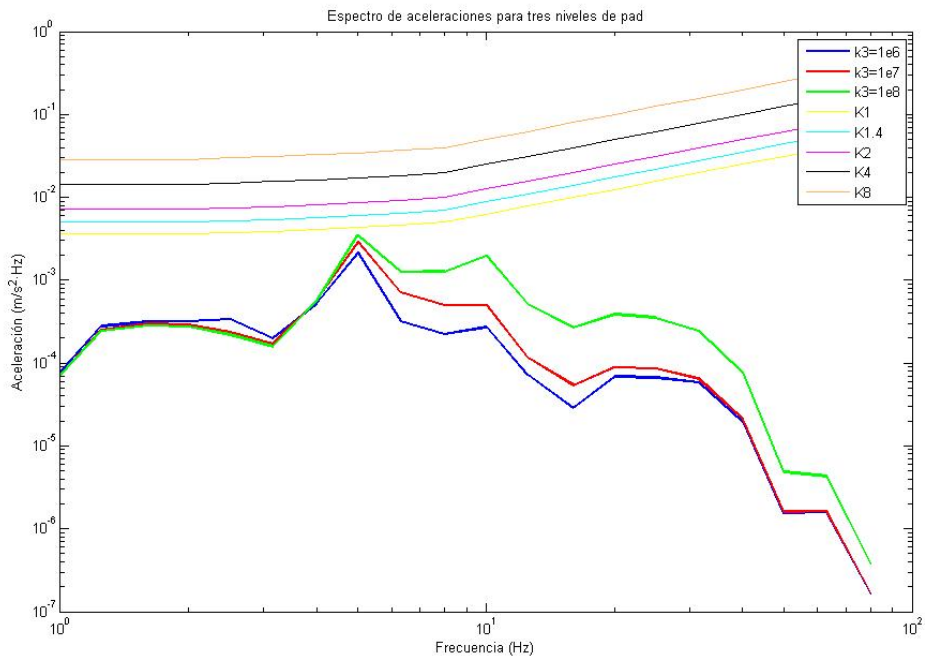


Figura 4. 16: Espectros de velocidades y aceleraciones verticales del terreno estratificado en vía placa para tres niveles de pad ante variaciones en la rigidez del último nivel y espectro de aceleraciones en escala de tercio de octavas junto con las limitaciones impuestas con la normativa.

4.3.3. Influencia del amortiguamiento.

Se pretende determinar el efecto de la variación del factor de amortiguamiento cuando se disponen dos y tres niveles de pad (figuras 4.17 y 4.18 respectivamente), dejando en último lugar el análisis de la variación del amortiguamiento en el tercer nivel de pad, con las capas anteriores invariables (figura 4.19). Los valores del factor de amortiguamiento con los que se realiza la comparación para los primeros niveles de amortiguamiento son 0.2, 0.5 y 0.75; y 62e3, 75e3 y 90e3 Ns/m para la tercera línea de pad.

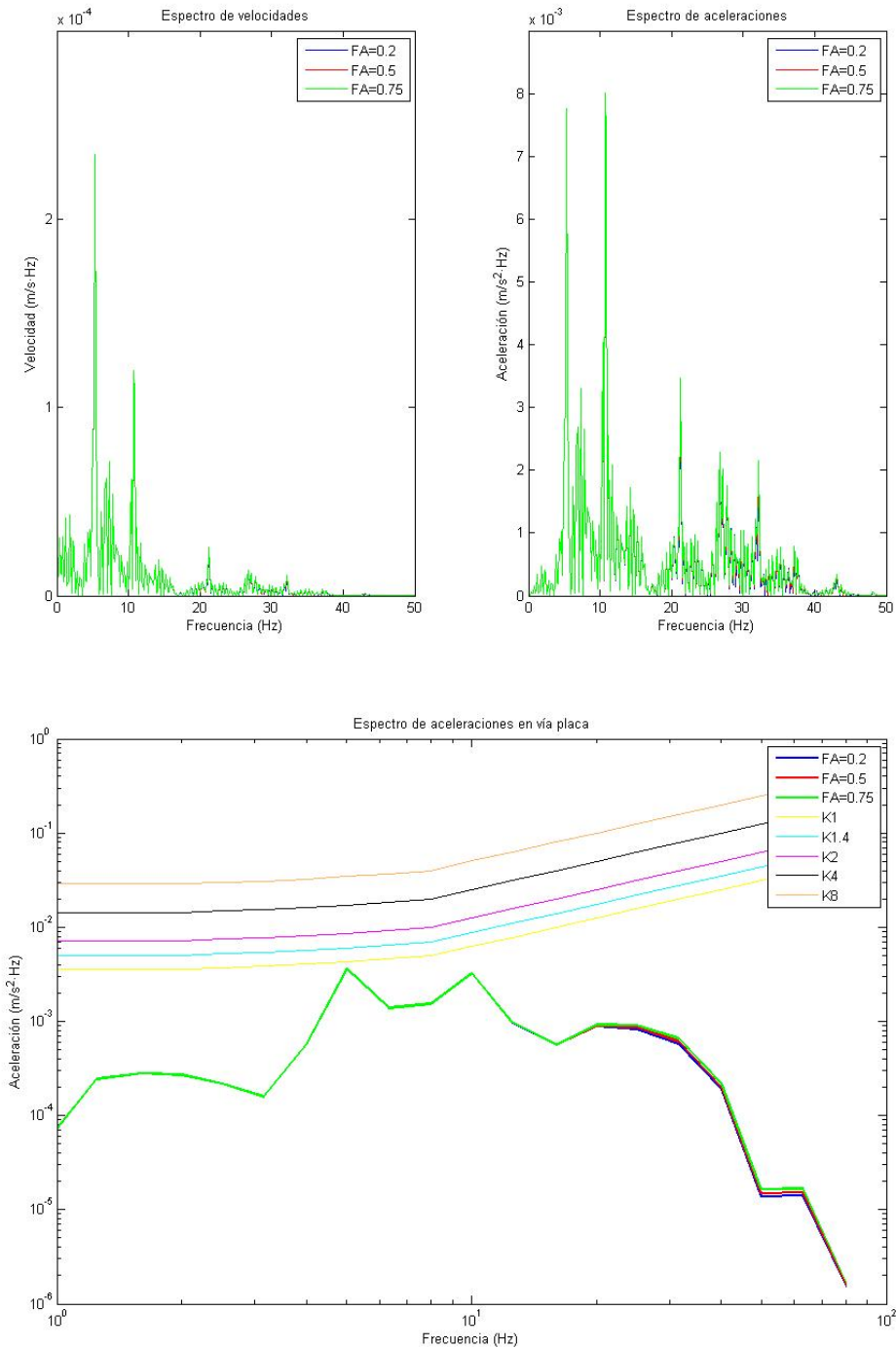
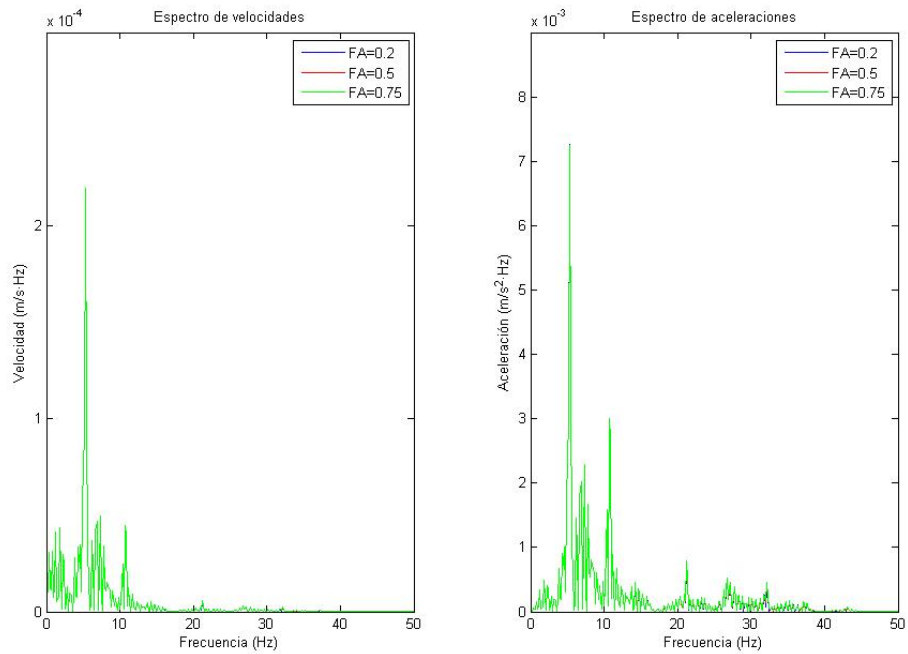


Figura 4. 17: Espectros de velocidades y aceleraciones verticales del terreno estratificado en vía placa para dos niveles de pad ante variaciones en el factor de amortiguamiento en los primeros niveles de pad, y espectro de aceleraciones en escala de tercio de octavas junto con las limitaciones impuestas con la normativa

Tal y como se ha introducido al comienzo del apartado, en este caso se varía el valor del amortiguamiento en el tercer nivel de pad, manteniendo constante los demás niveles siendo el resultado el que se muestra a continuación:



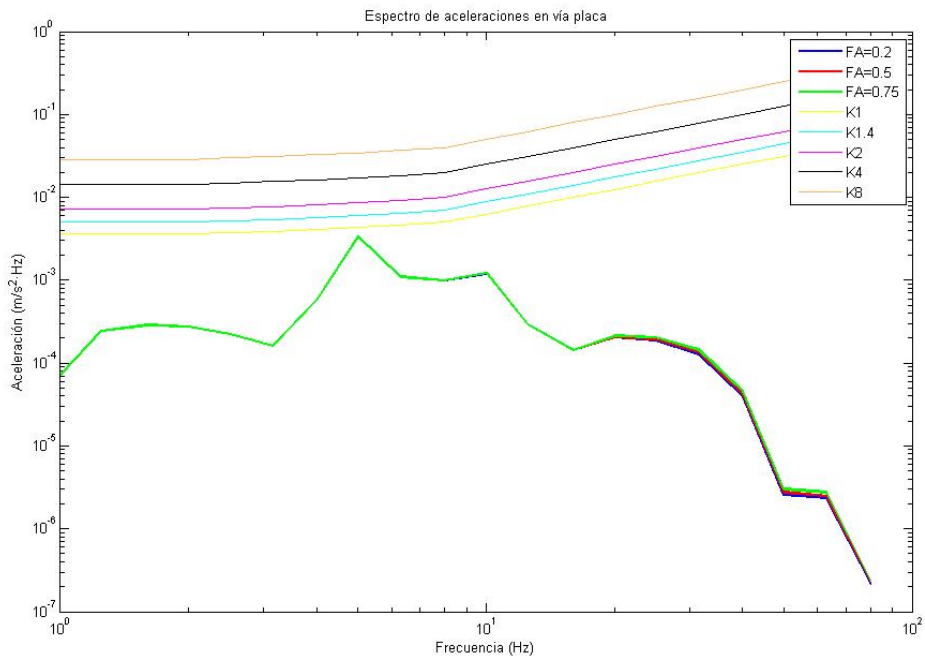
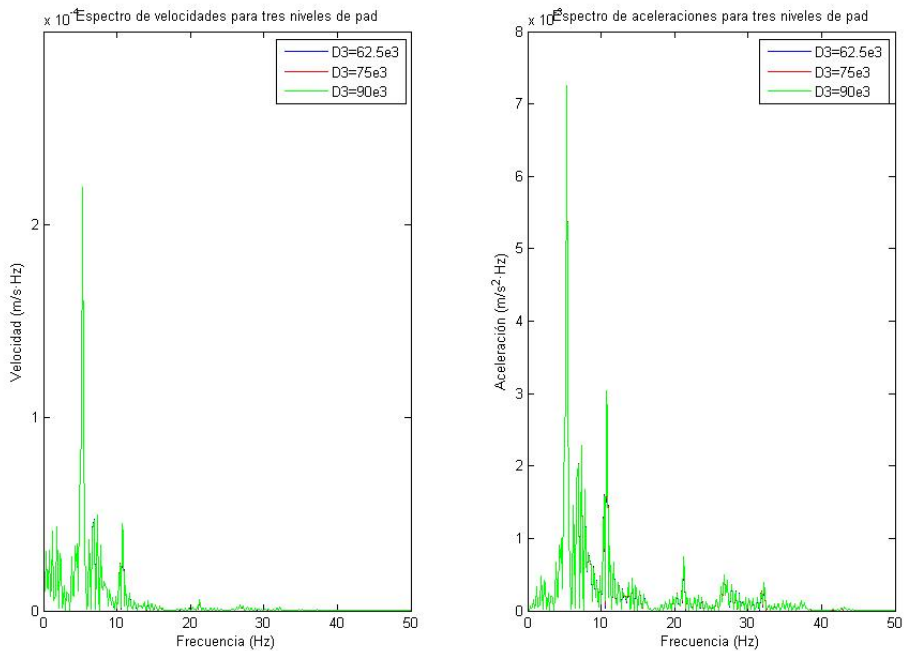


Figura 4. 18: Espectros de velocidades y aceleraciones verticales del terreno estratificado en vía placa para tres niveles de pad ante variaciones en el factor de amortiguamiento de los dos primeros niveles, y espectro de aceleraciones en escala de tercio de octavas junto con las limitaciones impuestas con la normativa



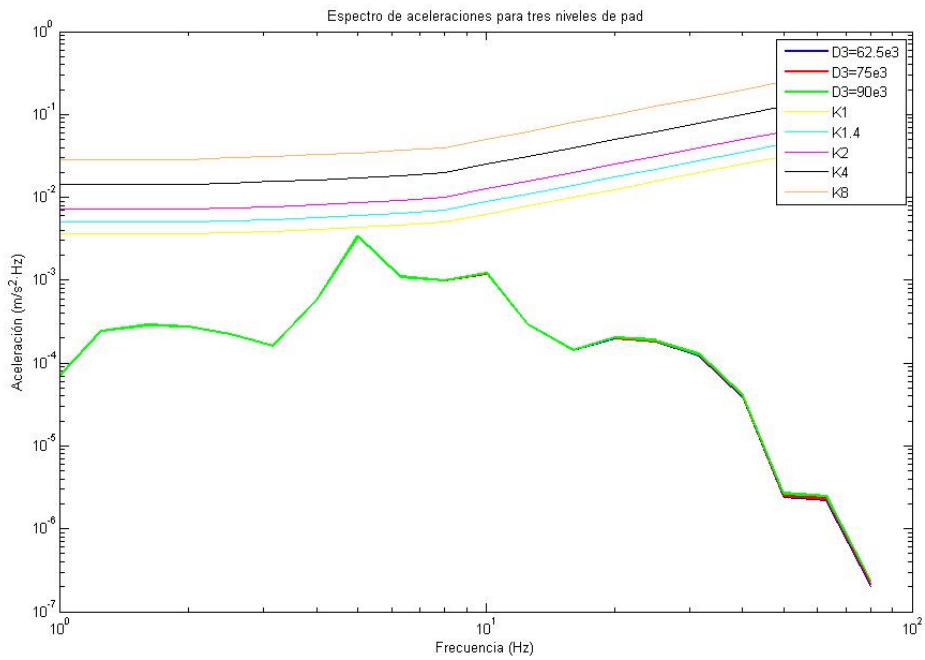
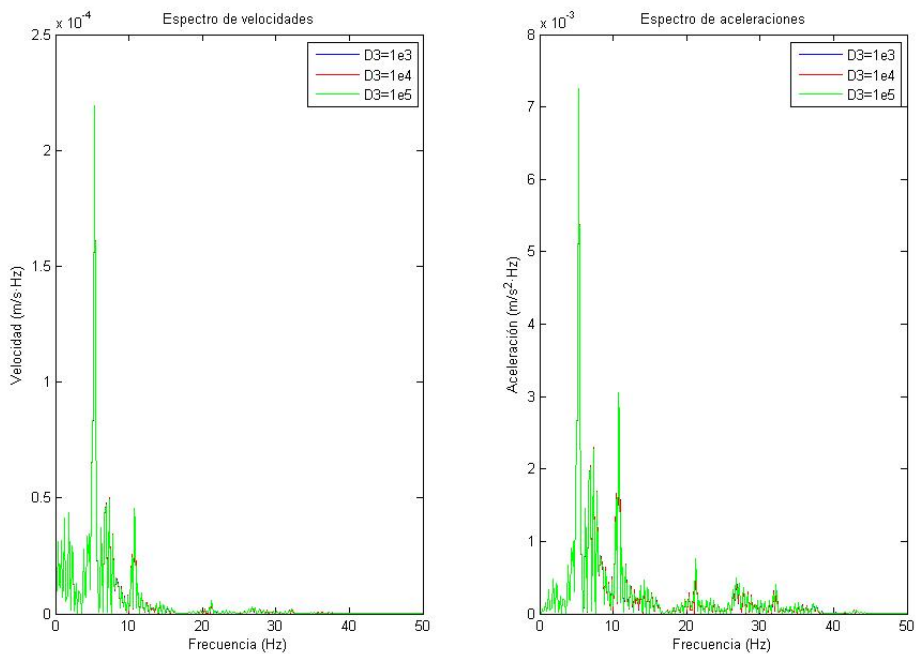


Figura 4. 19: Espectros de velocidades y aceleraciones verticales del terreno estratificado en vía placa para tres niveles de pad ante variaciones en el amortiguamiento del tercer nivel, y espectro de aceleraciones en escala de tercio de octavas junto con las limitaciones impuestas con la normativa



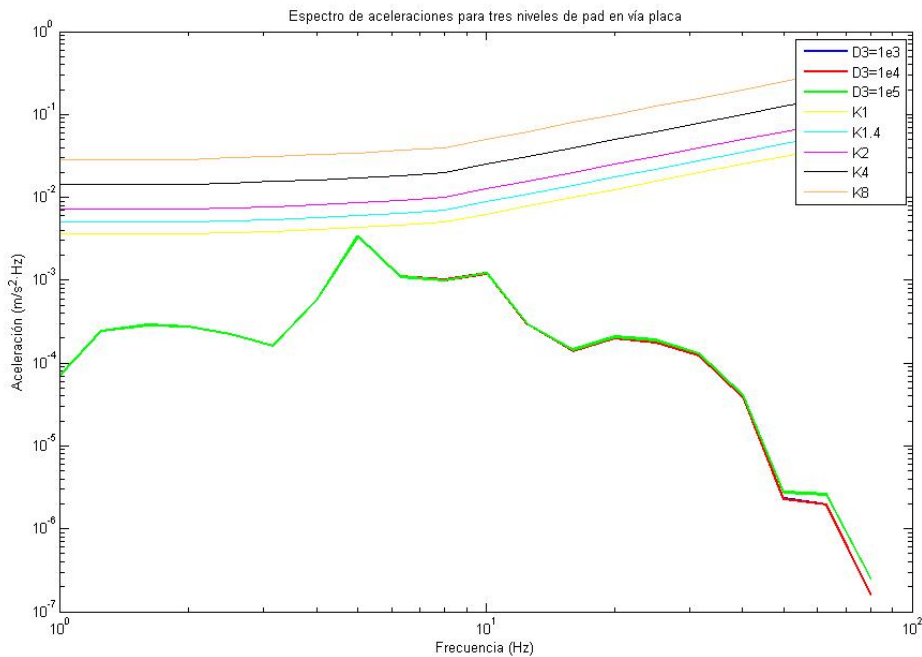


Figura 4. 20: Espectros de velocidades y aceleraciones verticales del terreno estratificado en vía placa para tres niveles de pad ante variaciones en el orden de magnitud del amortiguamiento en el tercer nivel de amortiguamiento, y espectro de aceleraciones en escala de tercio de octavas junto con las limitaciones impuestas con la normativa

Después de analizar las gráficas de esta sección se llega a la conclusión de que, en caso de considerar la configuración de vía placa, la modificación del factor de amortiguamiento en las primeras líneas de pad, o del amortiguamiento en el tercer nivel de pad no produce ninguna mejora apreciable en la reducción de vibraciones. Es decir, que el parámetro más importante en el diseño de la vía placa es la rigidez del tercer nivel de pad.

4.4. CONCLUSIONES.

En los apartados anteriores se ha expuesto el proceso seguido para intentar encontrar una combinación de valores en las propiedades mecánicas de las líneas de

amortiguamiento que permitan reducir el nivel de las vibraciones producidas por un ferrocarril circulando a cierta velocidad sobre un terreno.

Para decidir el número de líneas de amortiguamiento habría que tener en cuenta el rango de frecuencias de interés, ya que dependiendo de esto podría justificarse la introducción de hasta tres niveles de pad.

Es decir, en vía balasto:

- Para frecuencias inferiores a 20 Hz no existe diferencias al aumentar los niveles de amortiguamiento. Por lo tanto, no se encuentran razones para situar más de un nivel de amortiguamiento porque la reducción de vibraciones no es elevada y el gasto económico no estaría justificado.
- Para frecuencias mayores de 20 Hz se consigue bajar el rango de vibraciones, aunque a partir de 40 Hz las vibraciones están por debajo del límite menor que señala la normativa y no tendría sentido aumentar el número de pad, si no es porque se producen diferencias entre los valores de los espectros cuando hay paso de tren y cuando no lo hay. Esta diferencia puede ocasionar molestias al ser percibidas de forma subjetiva.

Aún así, la forma más desfavorable, y que se desaconseja en todos los casos, es la de disponer dos líneas de pad ya que se tienen los mismos resultados que considerando una única línea, entre raíl y traviesa.

Además, no haría falta conseguir un elemento que proporcionara una constante de rigidez en los primeros niveles de pad determinada, ya que se ha demostrado que el valor de dicho parámetro no juega ningún papel en la disminución de vibraciones.

En cuanto a la rigidez del tercer nivel de pad, sí se tienen cambios en la respuesta cuando variamos el orden de magnitud, pero dependen de la frecuencia en la que estemos interesados, por lo que la elección debe hacerse con cuidado.

La vía en placa sigue la misma tendencia que la vía balasto aunque con un solo punto de inflexión en el comportamiento de las ondas, a 5 Hz, siendo el único resultado válido para conseguir el objetivo del capítulo el de situar tres niveles de amortiguamiento, y sólo para frecuencias superiores a los 5 Hz citados anteriormente.

Al igual que antes, sólo variando la rigidez del tercer nivel de amortiguamiento se encuentran reducciones aceptables. Por ejemplo, para 10 Hz la diferencia entre considerar una rigidez del tercer nivel de pad del orden de $1e8 \text{ N/m}^2$ a $1e6 \text{ N/m}^2$ reduce las aceleraciones de $2e-3 \text{ m/s}^2 \cdot \text{Hz}$ a $3e-4 \text{ m/s}^2 \cdot \text{Hz}$.

En definitiva, los estudios realizados muestran que el comportamiento de placas elásticas intermedias situadas en vía balasto no logran una aportación notable en la reducción del nivel de emisión, y por tanto, se deberán buscar soluciones alternativas para conseguir dichos objetivos. De la misma manera ocurre en vía placa, aunque para esta tipología si se encuentra alguna mejora modificando la rigidez de la línea situada entre la placa y el terreno.