

INFLUENCIA DE LA RUGOSIDAD DE RUEDA EN LOS NIVELES DE RUIDO GENERADOS POR TRENES EN LÍNEAS DE CERCANÍAS

PACS: 43.50.LJ

Leal López, Ana; Aspuru, Itziar.

Tecnalia, Parque Tecnológico de Bizkaia, Edificio 700, España, 607049551, anamaria.leal@tecnalia.com

Ruiz Sierra, Marta; Riera Fernández, Jose Luis; Ortiz Mora, Jose Ignacio; Aranda Dominguez, Belén.

ADIF AV, C/Titán 4-6, 2ª planta, Madrid, España, 663810054, mruizsierra@adif.es

Palabras Clave: rugosidad de rueda, ruido de impacto, método CNOSSOS, ruido ambiental, contaminación acústica.

ABSTRACT

This communication analyzes the wheel roughness's influence in the noise levels generated by commuter trains. In this way, comparatives are presented between trains with different wheel roughness, both of measured noise levels and other parameters related to the common method of calculation CNOSSOS. At the same time, the effect of impact noise is analyzed for trains with different wheel roughness. This work has been carried out by ADIF AV and Tecnalia in collaboration with RENFE, under the project of implantation of the CNOSSOS method.

RESUMEN

La presente comunicación analiza la influencia de la rugosidad de rueda en trenes que circulan por líneas de cercanías en los niveles de ruido al paso generados. De esta manera, se presentan comparativas entre trenes con diferente rugosidad de rueda, tanto de niveles de ruido medidos, como de otros parámetros relativos al método común de cálculo CNOSSOS. A su vez, se analiza el efecto del ruido de impacto en trenes con diferente rugosidad de rueda. Este trabajo ha sido realizado por ADIF AV y Tecnalia en colaboración con Renfe bajo el proyecto de implantación del método CNOSSOS.

1. INTRODUCCIÓN

Este estudio se enmarca dentro del proyecto de implantación del método común de evaluación de ruido ambiental CNOSSOS en la modelización del ruido producido por las circulaciones ferroviarias de ADIF AV. En dicho proyecto se han llevado a cabo una serie de campañas de medidas con el objetivo de caracterizar los diferentes trenes, infraestructuras (vías) y efectos singulares (ruido de impacto, ruido aerodinámico, chirrido, etc.). En la caracterización se han utilizado los valores o categorías que ofrece por defecto el método de cálculo para cada parámetro, o bien se ha creado una nueva categoría cuando el resultado de la medida no se ajusta a ninguna de las categorías existentes en el método. El resultado de este proyecto ha sido una base de datos con los valores de entrada para trenes, infraestructuras y efectos singulares en la modelización de ruido ferroviario con el método de cálculo CNOSSOS.

El método de cálculo CNOSSOS está descrito en la Directiva 2015/996 de la Comisión, por la que se establecen los métodos comunes de evaluación del ruido en virtud de la Directiva

2002/49/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, y en la Directiva Delegada 2021/1226 de la Comisión, por la que se modifica la anterior [1].

Este método define 6 tipos de fenómenos de generación de ruido ferroviario que contribuyen en dos focos emisores y que representan la línea ferroviaria a dos alturas sobre el terreno, a 0,5 m y 4 m, respectivamente:

- Ruido de rodadura: se produce por la interacción de la rueda del vehículo con el carril.
- Ruido de tracción: representa la contribución del motor y del equipamiento auxiliar de cada tipo de vehículo.
- Ruido de impacto: depende de la presencia de discontinuidades en la vía.
- Ruido aerodinámico: representa el ruido generado por el flujo de aire en contacto con el vehículo.
- Ruido de chirrido: aplicable para las curvas de radio reducido.
- Ruido por radiación estructural: producido por puentes y/o viaductos metálicos.

El esquema siguiente refleja la contribución de cada fenómeno acústico a cada foco de ruido.

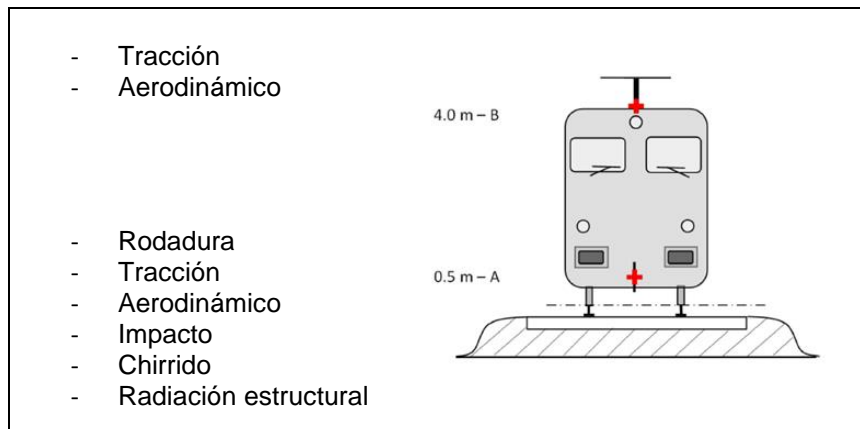


Figura 1 – Fenómenos que contribuyen a la emisión.

Para calcular los distintos focos de ruido, a continuación, se enumeran los parámetros que requieren datos de entrada en el método CNOSSOS:

- Respecto al material rodante:
 - o Velocidad de circulación
 - o Composición del vehículo por tipo y número de unidades
 - o Número de ejes de cada unidad
 - o Rugosidad de rueda, $L_{r,VEH,i}$
 - o Filtro de contacto, $A_{3,i}$
 - o Función de transferencia de la rueda, $L_{H,VEH,i}$
 - o Ruido de tracción – motor y equipos auxiliares, $L_{W,0,idling}$
 - o Ruido aerodinámico, $L_{W,0,1}$, $L_{W,0,2}$, α_1 , α_2
- Respecto a la infraestructura
 - o Rugosidad del carril, $L_{r,TR,i}$
 - o Función de transferencia del carril, $L_{H,TR,i}$
 - o Rugosidad adicional de impacto, $L_{R,IMPACT,i}$ y densidad de uniones, n_l
 - o Radio de curvatura en puntos singulares
 - o Función de transferencia puentes, $L_{H,bridge,i}$

Los valores propuestos por defecto por el método CNOSSOS para estos parámetros están contenidos en los documentos oficiales de descripción del método.

Tabla 1 – Elementos que influyen en cada fenómeno de ruido.

Fenómenos de ruido	Caracterización material móvil (trenes)	Caracterización infraestructura ferroviaria
	Velocidad modelización-circulación	
Ruido de rodadura	Número de ejes Composición del vehículo por tipo y número unidades Rugosidad acústica ruedas (tipos de frenos y mantenimiento) Función transferencia rueda (diámetro de rueda) Filtro de contacto entre carril y rueda (Carga por rueda – diámetro de rueda)	Rugosidad carril (mantenimiento) Función transferencia carril (tipo traviesa y placa de asiento)
Ruido tracción	Tipo Motor	
Ruido aerodinámico	$v > 250$ km/h	
Ruido impacto		Rugosidad adicional impacto (desvíos y juntas)
Ruido chirrido		Curvas de radio reducido (≤ 500 m)
Radiación estructural		Función de transferencia puentes (puentes de estructura metálica)

El presente estudio se centra en el análisis del efecto del parámetro de rugosidad de rueda, el cual teóricamente depende del tipo de freno del tren, y en los niveles de ruido medidos al paso del tren con y sin ruido de impacto. Para el análisis se utilizan tanto niveles de ruido medidos como calculados con el método CNOSSOS. Dicho estudio se lleva a cabo mediante la comparativa de dos tipos de trenes de cercanías con diferente tipo de freno: el tren CIVIA S-465, con freno de disco, y el tren S-450, con freno de zapata de hierro fundido.



Figura 2 – Trenes CIVIA S-465 (izquierda) y S-450 (derecha).

2. OBJETIVO

El objetivo general del estudio es analizar la influencia que tiene el parámetro de rugosidad de rueda del método CNOSSOS, que depende del tipo de freno, en los niveles de ruido generados al paso de un tren. El método CNOSSOS distingue entre tres tipos de frenos: zapata de hierro fundido, zapata material compuesto y disco.

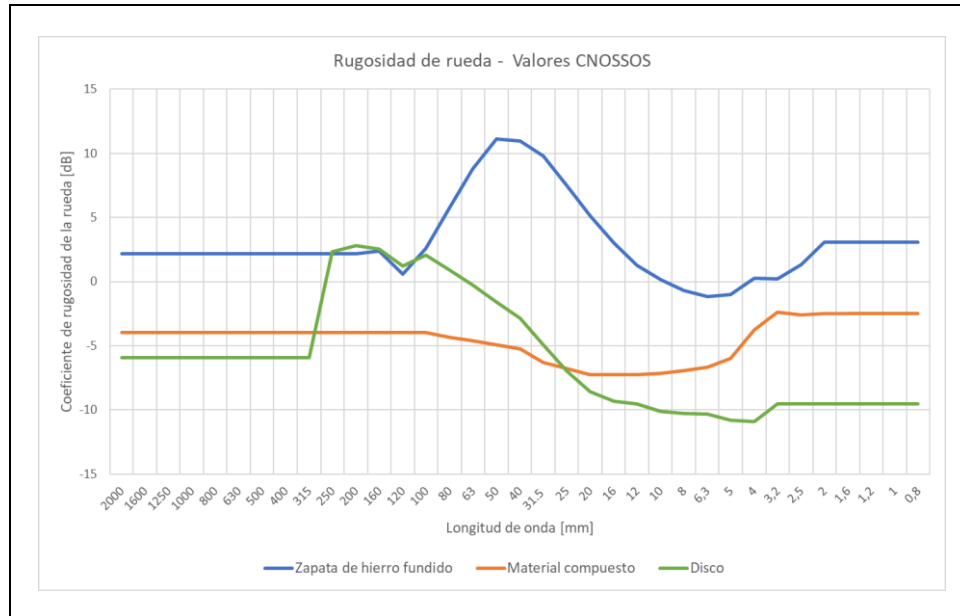


Figura 3 – Espectros de rugosidad de rueda para los diferentes frenos que ofrece el método CNOSSOS [2].

En este caso, el estudio se centra en la comparativa entre los trenes de cercanías CIVIA S-465 y S-450, el primero con freno de disco y el segundo con freno de zapata en algunas de sus unidades. A continuación, se enumeran los objetivos específicos perseguidos con la realización del estudio:

- Comprobar la adecuación de los valores de rugosidad de rueda que ofrece el método CNOSSOS, comparándolos con la realidad.
- Analizar el efecto del tipo de freno en los niveles de ruido generados al paso del tren.
- Analizar el efecto del ruido de impacto en trenes con rugosidad de rueda alta (zapata de hierro fundido) y trenes con rugosidad de rueda baja (disco).
- Comparativa del efecto del ruido de impacto medido y calculado con el método CNOSSOS.

En los siguientes apartados se explica detalladamente la metodología llevada a cabo para la realización del presente estudio, así como los resultados y las conclusiones obtenidas.

3. METODOLOGÍA Y RESULTADOS

Durante la realización del proyecto llevado a cabo por ADIF AV se han realizado una serie de campañas de medidas en diferentes tramos de la red ferroviaria gestionada por ADIF y ADIF AV con el objetivo de registrar los niveles de ruido, junto con otros parámetros, generados por los trenes e infraestructuras con mayor presencia en la red ferroviaria.

3.1. Análisis del efecto de la rugosidad de rueda

Partiendo de los resultados de estas campañas de medida, se han analizado los niveles de ruido al paso registrados, $L_{pAeq,TP}$, a 7,5 m de la vía y a 1,2 m de altura de los trenes de cercanías S-450 y CIVIA S-465. En la figura 4, se muestran los niveles de ruido medidos con respecto a la velocidad de circulación para cada tipo de tren. La línea discontinua representa la tendencia $30 \cdot \log(v)$, siendo v la velocidad.

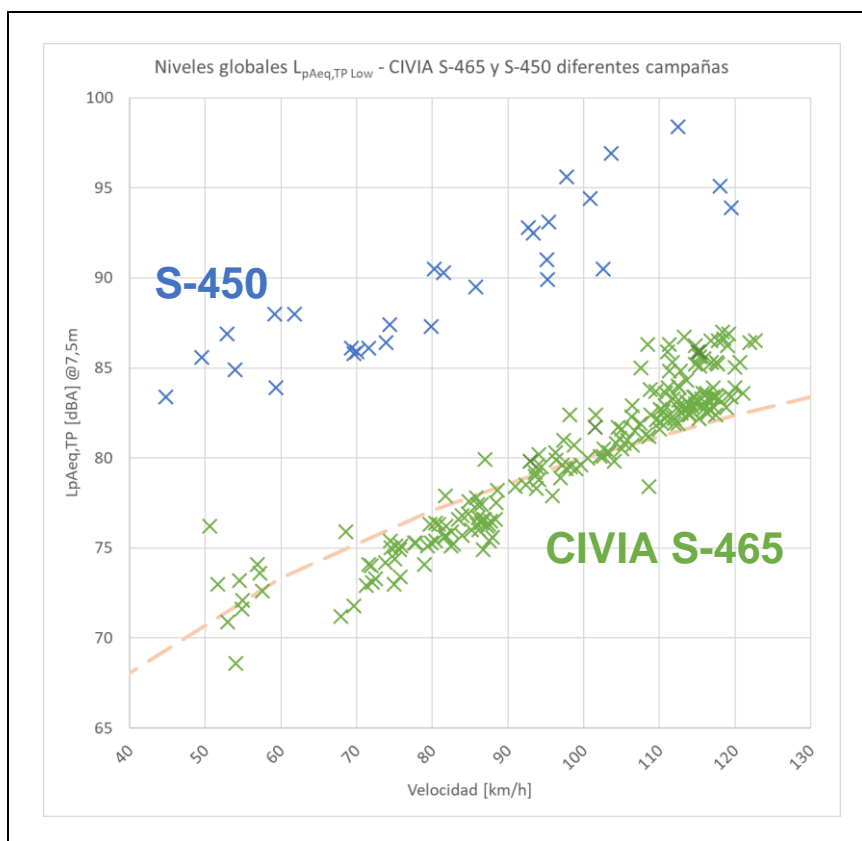


Figura 4 – Resultados en niveles globales $L_{pAeq,TP}$ medidos en diferentes campañas de medidas para los trenes CIVIA S-465 y S-450.

Atendiendo a la gráfica anterior, se observa la diferencia entre los niveles de ruido generados por el tren S-450, con freno de zapata de hierro fundido, y el tren CIVIA S-465, con freno de disco, siendo esta diferencia de 10 dB aproximadamente. Si bien es cierto que esta diferencia no se debe por completo al tipo de freno, ya que se trata de trenes diferentes con características diferentes, sí que tiene una influencia importante en los niveles de ruido.

Para demostrar el efecto de la rugosidad de rueda se ha calculado con CNOSSOS, a modo de ejemplo, el nivel de emisión L_w que produciría un tren CIVIA S-465 con diferentes tipos de freno y a diferentes velocidades.

Tabla 2 – Diferencia en emisión entre los frenos de zapata y disco de CNOSSOS para el CIVIA S-465.

Velocidad [km/h]	L_w con freno de zapata	L_w con freno de disco	Diferencia (efecto)
50	96,4	88,7	7,7
80	101,2	92,2	9
100	103,8	95,4	8,4

Para obtener los espectros de rugosidad de rueda medios de los trenes CIVIA S-465 y S-450, se han analizado los valores de vibración del carril y ruido de los pasos de tren registrados en las campañas de medidas.

La rugosidad total asociada a cada paso, parámetro $L_{R,TOT,i}$ ha sido obtenido con el método PBA (Pass-by Analysis). La rugosidad de carril $L_{r,TR,i}$ también se ha medido directamente en la vía según la norma EN 15610: 2019 en cada campaña. Con ambos datos y asumiendo el espectro que ofrece CNOSSOS para el filtro de contacto $A_{3,i}$ correspondiente a una carga por rueda de 25 kN y diámetro de rueda de 920 mm, se ha aplicado la fórmula (2) para obtener los espectros de rugosidad de rueda medios medidos de los trenes CIVIA S-465 y S-450.

Este procedimiento se ha realizado individualmente para cada paso de tren y, posteriormente, se ha realizado un promedio por campaña y tipo de tren, tras el cual se ha aplicado otro promedio por tipo de tren. Cabe mencionar que en el caso del tren S-450, también se ha incluido en el promedio medidas directas de rugosidad de rueda realizadas en taller de RENFE, de acuerdo a la norma EN 15610: 2019.

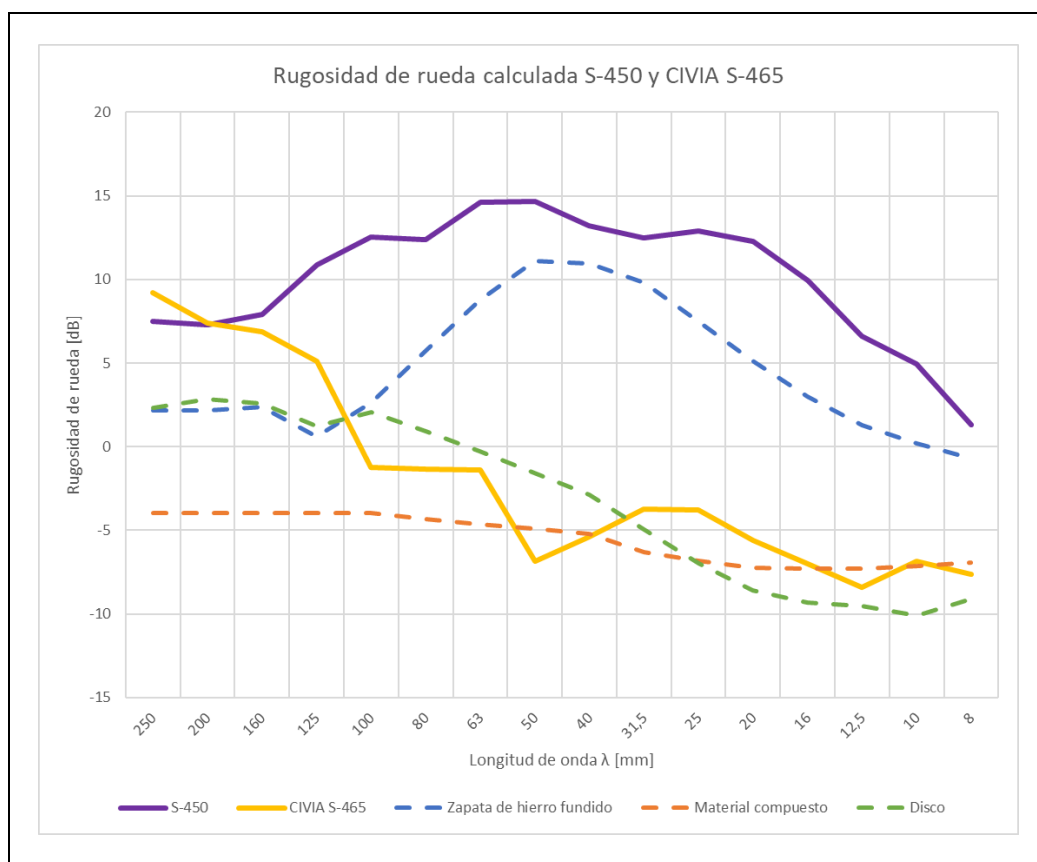


Figura 5 – Rugosidad de rueda obtenida a partir de medidas para los trenes S-450 y CIVIA S-465.

Atendiendo a la gráfica anterior, se observa que, en las longitudes de onda relevantes para las velocidades de circulación, los espectros de rugosidad de rueda del tren CIVIA S-465, se encuentran dentro de los rangos de los valores de los espectros por defecto que propone el método CNOSSOS para cada tren.

En el caso del tren S-450 se obtiene una rugosidad de rueda claramente superior a la que propone el método como dato por defecto para un freno de tipo zapata de hierro fundido. En este sentido, se ha creado una nueva categoría de rugosidad de rueda, superior a la de zapata de hierro fundido, para el tren S-450. Esta asignación queda recogida en la *Guía para la aplicación del método CNOSSOS-EU en la modelización del ruido producido por las circulaciones ferroviarias en las infraestructuras de ADIF y ADIF AV*.

3.2. Análisis del efecto del ruido de impacto en trenes con diferente rugosidad de rueda

Durante la realización del proyecto de implantación del método común de evaluación de ruido ambiental CNOSSOS en la modelización del ruido producido por las circulaciones ferroviarias de ADIF AV, se han llevado a cabo una serie de campañas de medidas específicas con el objetivo de cuantificar el efecto del ruido de impacto producido por diferentes tipos de desvíos.



Figura 6 – Ejemplo de desvío que genera un ruido de impacto.

Obviando el tipo de desvío del que se trate, con la realización de estas campañas de medidas, se ha observado que el efecto del ruido de impacto depende de la rugosidad de la rueda. Es menor en pasos de trenes con rugosidad de rueda alta respecto a pasos de trenes con rugosidad baja. Esta dependencia está correctamente reflejada en cómo considera el método CNOSSOS el ruido de impacto.

Así, se debe tener en cuenta que el ruido de impacto $L_{R,TOT+IMPACT,i}$ se concibe como un incremento energético a la rugosidad efectiva total $L_{R,TOT,i}$ [2].

$$L_{R,TOT+IMPACT,i} = 10 \cdot \log (10^{L_{R,TOT,i}/10} + 10^{L_{R,IMPACT,i}/10}) \quad (1)$$

$L_{R,IMPACT,i}$ es un espectro en tercios de octava de longitud de onda λ , el cual se facilita en la Directiva Delegada 2021/1226 [3].

A su vez, la rugosidad efectiva total se define como la suma energética de los niveles de rugosidad de carril $L_{r,TR,i}$ y de la rueda $L_{r,VEH,i}$ más el filtro de contacto $A_{3,i}$.

$$L_{R,TOT,i} = 10 \cdot \log (10^{L_{r,TR,i}/10} + 10^{L_{r,VEH,i}/10}) + A_{3,i} \quad (2)$$

Por tanto, suponiendo un buen estado del carril (rugosidad de carril baja), el ruido de impacto tendrá mayor efecto en trenes con rugosidad de rueda baja (CIVIA S-465) que en trenes con rugosidad de rueda alta (S-450). Este hecho se evidencia, tanto en niveles de ruido medidos en las campañas, como en los resultados de cálculos con el método CNOSSOS.

Por un lado, se han calculado los niveles de emisión con y sin ruido de impacto en diferentes rangos de velocidades para un tren S-450 y para un tren CIVIA S-465. En estos cálculos, los valores asignados a ambos tipos de tren, para los diferentes parámetros del método, son los que

aparecen en la Guía para la aplicación del método CNOSSOS en la modelización del ruido producido por las circulaciones ferroviarias en las infraestructuras de ADIF y ADIF AV.

Tabla 3 –Niveles en emisión L_w calculados con CNOSSOS para un tren S-450.

Velocidad [km/h]	L_w sin impacto calculado CNOSSOS	L_w con impacto calculado CNOSSOS	Diferencia (efecto)
50	75,9	76,7	0,8
80	79,7	80,5	0,8
100	81,5	82,3	0,8

Tabla 4 –Niveles en emisión L_w calculados con CNOSSOS para un tren CIVIA S-465.

Velocidad [km/h]	L_w sin impacto calculado CNOSSOS	L_w con impacto calculado CNOSSOS	Diferencia (efecto)
50	61,7	67	5,3
80	63,8	70,6	6,8
100	65,3	72,4	7,1

Por otro lado, en una de las campañas se han medido los niveles de ruido del paso, globales $L_{pAeq,TP}$, a 7,5 metros de los ejes con y sin ruido de impacto en una sección recta y en una sección con desvío, con el mismo tipo de vía y mismo paso de tren, por lo que cualquier diferencia entre niveles se debe al ruido de impacto.

Tabla 5 – Ejemplos de niveles medidos $L_{pAeq,TP}$ para un paso del tren S-450.

Velocidad [km/h]	L_p sin impacto medido	L_p con impacto medido	Diferencia (efecto)
117	95,1	95,8	0,7
119	93,9	95,2	1,3

Tabla 6 – Ejemplos de niveles medidos $L_{pAeq,TP}$ para un paso del tren CIVIA S-465.

Velocidad [km/h]	L_p sin impacto medido	L_p con impacto medido	Diferencia (efecto)
115	85,9	91,5	5,6
116	85,9	91,4	5,5

Atendiendo a los resultados anteriores, se verifica mediante medidas, que la presencia de un desvío incrementa los niveles de ruido. También se verifica que el efecto del ruido de impacto medido, es menor para pasos de trenes con rugosidad de rueda alta, en este caso los pasos del tren S-450, y es mayor, en los pasos de trenes con menor rugosidad, como es el CIVIA S-465. Atendiendo a las tablas 3 y 4, se confirma que CNOSSOS refleja correctamente esta tendencia.

5. CONCLUSIONES

Con la realización del presente estudio se puede concluir que las diferencias en niveles de ruido generados por un tren con freno de disco (CIVIA S-465) y un tren con freno de zapata de hierro fundido (S-450) son muy notables, en torno a 10 dB en niveles medidos. Este comportamiento lo refleja el método CNOSSOS, con diferencias calculadas de hasta 9 dB, en función de la velocidad, utilizando para el cálculo los valores por defecto del método.

En cuanto al efecto del ruido de impacto, los resultados obtenidos del análisis de las campañas de medida muestran que, la presencia de una discontinuidad, incrementan los niveles de ruido medidos, aunque este incremento será mayor o menor en función de la rugosidad de rueda del tren, suponiendo un buen estado del carril.

De hecho, los resultados de las campañas de medida muestran que el efecto en los pasos de trenes con baja rugosidad de rueda, como es el tren CIVIA S-465, es más alto que en trenes con rugosidad de rueda alta, como son los trenes S-450. De esta forma, se verifica que el efecto del ruido de impacto en los niveles de ruido medidos depende de las características de los trenes que circulan sobre los desvíos o juntas.

Aplicado el método CNOSSOS en ambas situaciones, se confirma lo adecuado de la aproximación del método en representar este efecto con una rugosidad adicional, lo que hace que el efecto dependa de la rugosidad de la rueda del tren.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a RENFE Fabricación y Mantenimiento, por colaborar en la realización de medidas directas de rugosidad de rueda en sus talleres de mantenimiento, a los responsables de ADIF de la Subdirección de Infraestructura y Vía, por colaborar en la descripción del tipo de desvíos y en su localización para la realización de las medidas de caracterización.

REFERENCIAS

[1] **ADIF AV.** *Guía para la aplicación del método CNOSSOS-EU en la modelización del ruido producido por las circulaciones ferroviarias en las infraestructuras de ADIF y ADIF AV.* 2022.

[2] **Comisión europea.** *DIRECTIVA (UE) 2015/996 DE LA COMISIÓN de 19 de mayo de 2015 por la que se establecen métodos comunes de evaluación del ruido en virtud de la Directiva 2002/49/CE del Parlamento Europeo y del Consejo.* Bruselas : s.n., 2015.

[3] **Comisión europea.** *DIRECTIVA (UE) 2021/996 DE LA COMISIÓN de 21 de diciembre de 2020 por la que se modifica, para adaptarlo al progreso científico y técnico, el anexo II de la Directiva 2002/49/CE del Parlamento Europeo y del Consejo en cuanto a los métodos comunes para la evaluación del ruido.* Bruselas : s.n., 2020.