



# Control del desgaste ondulatorio en carriles con apoyo continuo

R. Robles<sup>1</sup>, N. Correa<sup>1</sup>, E. García Vadillo<sup>1</sup>, J. Santamaría<sup>1</sup>, J. Astarloa<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Dpto. de Ingeniería Mecánica, Universidad del País Vasco UPV/EHU, [rakel.robles@ehu.es](mailto:rakel.robles@ehu.es), [nekane.correa@ehu.es](mailto:nekane.correa@ehu.es), [ernesto.garciavadillo@ehu.es](mailto:ernesto.garciavadillo@ehu.es), [javier.santamaria@ehu.es](mailto:javier.santamaria@ehu.es)

<sup>2</sup> Euskal Trenbide Sarea-Red Ferroviaria Vasca ETS-RFV, [jastarloa@ets-rfv.eus](mailto:jastarloa@ets-rfv.eus)

---

*En este trabajo se estudia el efecto de diferentes factores en el desarrollo y crecimiento del desgaste ondulatorio de los carriles de una vía real de tranvía, mediante un modelo desarrollado, adaptado y validado por los autores. Para ello, en primer lugar, ha sido necesario obtener experimentalmente las propiedades de la vía y del eje montado de los tranvías, para lo cual se han medido sus receptancias. Por otro lado, se ha caracterizado la dureza de los materiales de las superficies en contacto y se han realizado mediciones de coeficiente de fricción en el contacto entre la rueda y el carril. Estas mediciones experimentales han sido esenciales para demostrar la variabilidad de las propiedades dinámicas de la vía del tranvía y para predecir el desgaste de los carriles. Los factores que se han considerado en este estudio son: los posibles defectos de soldadura, la geometría y las propiedades dinámicas de la vía. Los resultados de desgaste demuestran que la reparación de soldaduras desgastadas tiene un efecto positivo porque reduce el crecimiento de la corrugación y que, cuando la vía no presenta propiedades dinámicas constantes, la tasa de crecimiento de la corrugación se reduce considerablemente.*

---

## 1. Introducción

El desgaste ondulatorio o corrugación del carril es un defecto con forma ondulada que se desarrolla en la dirección longitudinal de la vía, con una longitud de onda determinada. Este tipo de desgaste se ha observado en la mayoría de las líneas ferroviarias de todo el mundo, principalmente en líneas de tranvía y metro [1, 2]. Dado que este fenómeno supone un problema para los ferrocarriles de todo el mundo, con elevados costes de mantenimiento y problemas de ruido y vibraciones, se ha abordado en numerosos estudios a lo largo de los años.

La corrugación aparece principalmente en curvas cerradas, pero también en rectas. Varios autores han llegado a la conclusión de que el pseudodeslizamiento lateral es la razón principal del desarrollo de la corrugación en curvas cerradas [3, 4]. En el caso de las vías rectas, donde el pseudodeslizamiento lateral es despreciable comparado con el pseudodeslizamiento longitudinal, se ha estudiado el efecto de dicho pseudodeslizamiento longitudinal y de la tracción o frenada del vehículo [5, 6].

Entre los factores que influyen en el desarrollo de la corrugación se incluyen: cambios en las condiciones de contacto como la presencia de lubricantes [7, 8], una pendiente negativa en la curva de tracción [9, 10], la rugosidad del carril [11], las propiedades dinámicas [12-14], los cambios en el pseudodeslizamiento o la presencia de irregularidades específicas en la cabeza del carril, como las soldaduras [15].

En este trabajo se estudia el desarrollo y crecimiento del desgaste ondulatorio en una línea de tranvía situada en el área de Bilbao. El estudio se inició por la necesidad de mitigar los problemas de ruido y vibraciones en las proximidades debido a la amplitud de la corrugación. Así, se seleccionó un tramo de la vía para su estudio con el fin de analizar el impacto de diferentes factores en la tasa de crecimiento de la corrugación. Para ello, se ha desarrollado un modelo de predicción del desgaste que tiene en cuenta la geometría del carril y la flexibilidad de la vía, además de considerar el efecto de la tracción de los vehículos. A lo largo del último siglo se han desarrollado diversos modelos para predecir el desgaste ondulatorio, los cuales se clasifican fundamentalmente en modelos en el dominio de la frecuencia [16, 17] y en el dominio del tiempo [18-20].

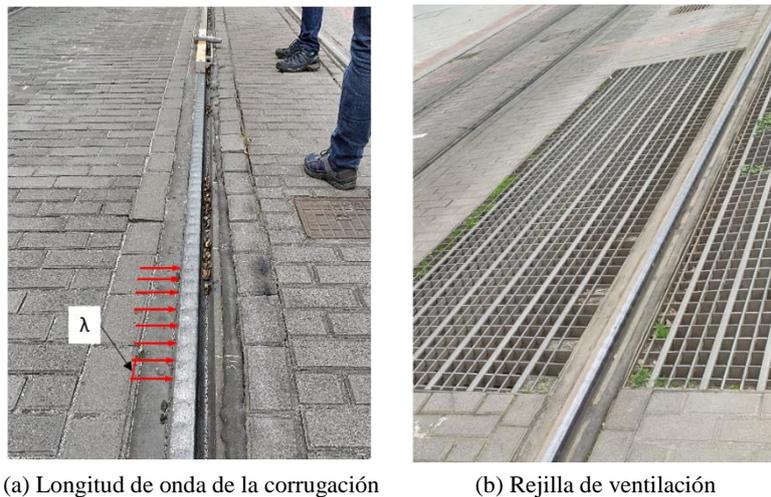
En este trabajo se ha utilizado un modelo en el dominio del tiempo obtenido a partir de las receptancias experimentales de la vía y el eje montado. Se ha optado por este modelo ya que permite tener en cuenta la no linealidad en el contacto, a la vez que se trata de un modelo con un coste computacional muy bajo para el cálculo de desgastes a lo largo del tiempo. Los resultados obtenidos con el modelo desarrollado se han comparado con éxito con las mediciones experimentales de la geometría del carril. Posteriormente, se ha obtenido el desgaste tras un número determinado de pasadas de ejes montados, para los siguientes estudios: límite de crecimiento del desgaste ondulatorio del carril antes del amolado periódico, límites de la geometría de la irregularidad que queda tras la realización de soldaduras y el efecto de la variación de las receptancias de la vía.

El artículo se divide en 5 secciones. La primera sección ofrece una visión general del problema del desgaste ondulatorio del carril. La sección 2 describe la línea estudiada y presenta las mediciones experimentales realizadas en la vía del tranvía. Las secciones 3 y 4 presentan el modelo desarrollado y la comparación de los resultados obtenidos con las mediciones experimentales. Posteriormente, se describe el estudio realizado a partir del modelo desarrollado (sección 5) y se discuten las conclusiones del trabajo (sección 6).

## 2. Mediciones experimentales

En este trabajo se presenta un estudio del crecimiento del desgaste ondulatorio en la línea de tranvía Bolueta-La Casilla de Bilbao, en la que se ha observado un aumento significativo de esta irregularidad a lo largo del tiempo.

La línea de tranvía estudiada es una vía embebida con carril de garganta 60R1 y grado de dureza R260. La sección de vía en cuestión es una vía recta en la que la corrugación se ha desarrollado considerablemente (véase la Figura 1). La Figura 1(a) muestra la longitud de onda del desgaste ondulatorio mediante flechas rojas ( $\lambda$ ) y la Figura 1(b) muestra una rejilla de ventilación. Esta rejilla se encuentra dentro de la sección de vía estudiada, y se ha tenido en cuenta en este trabajo, ya que se sospechaba que podía provocar cambios en las propiedades dinámicas de la vía y, por tanto, en el desarrollo del desgaste ondulatorio.



**Figura 1:** Vía de tranvía estudiada.

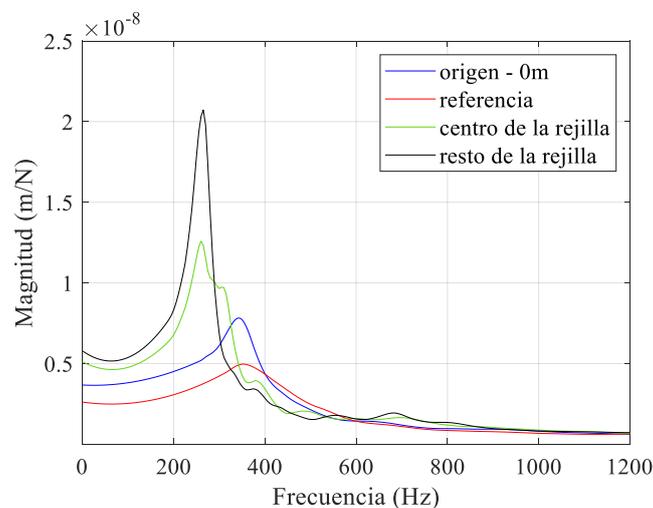
Para determinar las propiedades dinámicas del eje montado y de la vía, definir los materiales en contacto y determinar la curva de tracción, se han realizado una serie de mediciones experimentales. Estas mediciones se describen en las siguientes subsecciones (2.1, 2.2, 2.3 y 2.4). Posteriormente, estos datos experimentales se emplearán como entrada para el modelo desarrollado.

### 2.1. Propiedades dinámicas de la vía

Las propiedades dinámicas de la vía se han obtenido mediante la medida de sus receptancias. Mientras que en vías en curva es muy importante la dinámica lateral de la vía a la hora de determinar el desarrollo de la corrugación, en vías en recta, como la que se ha estudiado, la dinámica lateral tiene un efecto muy reducido en el desarrollo de la corrugación. Por tanto, en este trabajo, se ha tenido en cuenta solamente la dinámica vertical de la vía.

Para el caso estudiado se han medido experimentalmente las receptancias verticales mediante *impact testing* en diferentes posiciones a lo largo de la vía para poder tener en cuenta la fluctuación de la rigidez del soporte de la vía, a lo largo de la misma. Para ello se ha utilizado un martillo instrumentado (PCB 086D05), acelerómetros (PCB 325C33 ICP), un equipo de adquisición de datos (LMS Scadas Mobile SCM05) y el software para ensayos de impacto (Test Lab 17.1). Las mediciones se realizaron cada 2 metros, a lo largo de un tramo de vía de 33 m. En la rejilla de ventilación que se observa en la Figura 1(b), la distancia entre mediciones se redujo a 0,5 metros para una mayor resolución de las receptancias en esta zona. Esta rejilla se sitúa entre el metro 26 y el 30.

Los resultados demuestran que, a pesar de la ausencia de traviesas y de tener apoyo continuo de carril, el comportamiento dinámico de la vía no es uniforme en toda su longitud debido a la rejilla de ventilación. En el tramo analizado se han identificado 4 receptancias diferentes, tal y como se muestra en la Figura 2. La línea azul representa la receptancia medida en la posición de origen (0 m), la línea roja representa la receptancia observada a lo largo de la vía del tranvía, excepto en la zona de la rejilla, donde las receptancias están representadas por las líneas de color verde (centro de la rejilla) y negra en la Figura 2.

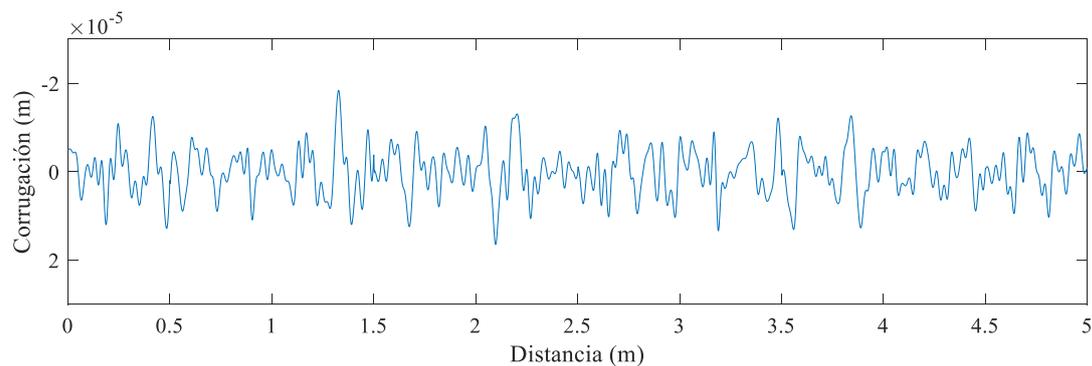


**Figura 2:** Receptancias verticales de la vía.

## 2.2. Geometría del carril

En esta línea de tranvía se ha medido la corrugación experimentalmente desde 2019 para estudiar su evolución a lo largo de los últimos 6 años. Los dispositivos utilizados para las mediciones del desgaste ondulatorio son una regla de medición de geometría y corrugación R2S de Metalelektro, utilizada hasta 2021, y un escáner de superficie de carril Railstraight Wave (RSW). Estas mediciones también han sido necesarias para proporcionar datos de entrada al modelo y comparar los resultados del modelo con la evolución del desgaste real del carril. El principio de medición de ambos dispositivos es el mismo. Durante cada medición, una sonda, cuyo funcionamiento se basa en un principio magnético, se desplaza a lo largo de toda la longitud del escáner del aparato (1 metro). El perfil longitudinal de la línea central de la cabeza del carril se obtiene midiendo la distancia entre el carril y el escáner a intervalos de 2 mm a lo largo de 1 m de longitud.

Las mediciones de geometría y corrugación se realizaron cada 1 m y luego se concatenaron para obtener la geometría de la cabeza de carril para toda la longitud del tramo de vía estudiado. Tras el postprocesado de los datos medidos experimentalmente, se obtiene el perfil del carril como se muestra en la Figura 3. La corrugación de esta figura se corresponde a la observada 5 meses después de la realización del amolado del carril. La amplitud de esta irregularidad es, por tanto, limitada, aunque es evidente que ya está desarrollando corrugación.



**Figura 3:** Medición experimental de corrugación a lo largo de 5 metros.

## 2.3. Dureza

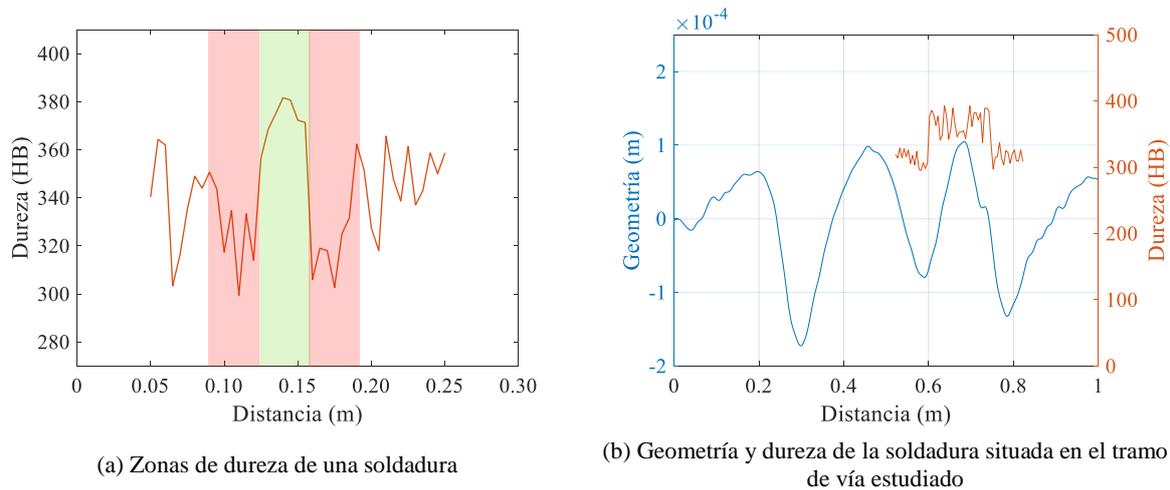
La dureza del material es un factor importante en el desarrollo del desgaste ondulatorio. En primer lugar, es relevante para detectar el cuerpo más blando (rueda o carril), ya que éste experimentará antes el desgaste. Además, está directamente relacionada con el desgaste mediante el modelo de Archard [21]. Por tanto, las mediciones de dureza se realizaron para los dos cuerpos en contacto: rueda y carril. Para ello, se utilizó un durómetro electrónico portátil de ERNST, modelo DYNATEST. En la bibliografía se incluye la documentación técnica que ayuda a la interpretación de la metodología empleada [22].

En la rueda estudiada, de grado de acero ER9, las mediciones se realizaron a lo largo de tres líneas paralelas desde la pestaña de la rueda hasta el borde de la cara frontal, con una separación mínima de 3 mm entre cada línea. El valor medio de dureza obtenido en la superficie de la rueda es de 342 HB.

También se evaluó la dureza del carril en la superficie de contacto rueda-carril en las soldaduras, ya que la dureza del carril es especialmente variable en este tipo de irregularidades. Suelen distinguirse tres zonas de dureza diferentes (ver Figura 4(a), una de las más de 50 soldaduras analizadas): la zona central (zona verde), las zonas afectadas térmicamente (zona roja) y el material base del carril (zona blanca).

En esta línea se han estudiado esas más de 50 soldaduras teniendo en cuenta su evolución en el tiempo. Las mediciones se han realizado en sentido longitudinal a intervalos de 5 mm. Para garantizar la repetibilidad de las mediciones, se realizaron al menos dos mediciones en cada posición longitudinal, en paralelo a la línea central.

La geometría de la soldadura de la sección de vía estudiada es la que se muestra con una línea azul en la Figura 4(b). Esta soldadura se utiliza como entrada para el modelo desarrollado. Cabe señalar que esta soldadura en particular ha sido reparada, y no se trata de la soldadura inicial. Además, el nuevo material de aporte muestra un valor de dureza superior al del material base. El efecto de esto ha sido un desgaste ligeramente menor en la zona endurecida.



**Figura 4:** Dureza y geometría de soldaduras medidas experimentalmente en la vía estudiada.

#### 2.4. Curva de tracción y coeficiente de fricción

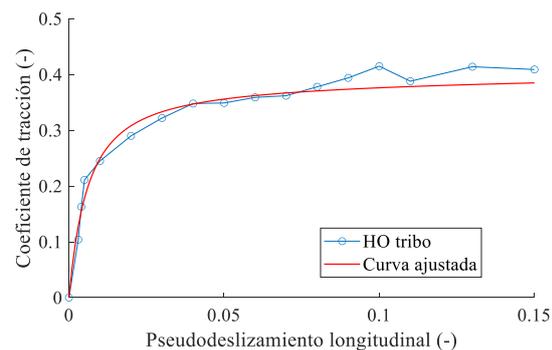
El coeficiente de fricción entre la rueda y el carril depende de los materiales en contacto, así como de muchos otros factores, como la humedad ambiental, el polvo, las hojas y la presencia de modificadores de fricción o lubricantes. Por ello, se ha estudiado el efecto del coeficiente de fricción en la evolución de la corrugación.

Para medir el coeficiente de fricción y la curva de tracción en el contacto rueda-carril se ha utilizado el tribómetro OnTrack HO (véase la Figura 5(a)). Se trata de un dispositivo de precisión que simula el contacto rueda-carril haciendo rodar una rueda de acero sobre el carril real. Para el ensayo realizado en este trabajo, se aplica una fuerza vertical de 45 N y un ángulo de giro con respecto a un eje vertical (ángulo de ataque). Este ángulo de giro produce un pseudodeslizamiento lateral en el punto de contacto, que a su vez genera una fuerza lateral en la dirección opuesta. El coeficiente de fricción puede calcularse midiendo la fuerza lateral, teniendo en cuenta la fuerza normal aplicada. El valor numérico del coeficiente de fricción proporcionado por el tribómetro en cada medición es la media de los valores obtenidos durante el movimiento de ida y vuelta de la rueda sobre el carril.

La curva de tracción obtenida en la sección estudiada puede observarse en la Figura 5(b). Además de la medición, la figura muestra también la curva ajustada según las ecuaciones de Polach y Spiryagin en [9,10]. Este ajuste resulta muy preciso para los valores de pseudodeslizamiento longitudinal del contacto rueda-carril en la sección estudiada. No obstante, la curva está sujeta a variaciones, debido a que pequeños cambios en la superficie de contacto, como la lluvia, las hojas o los modificadores de la fricción, pueden influir significativamente en el resultado.



(a) Tribómetro OnTrack HO



(b) Curva de tracción en la sección estudiada

**Figura 5:** Medidas experimentales de coeficiente de fricción y curva de tracción.

### 3. Modelo dinámico para la predicción del desgaste ondulatorio

El modelo desarrollado en este trabajo se basa en gran medida en un modelo anterior, descrito en [23]. La base de este modelo ha sido previamente validada mediante la comparación de los resultados obtenidos con los modelos de Meehan en [19] y Wu y Thompson y Pieringer en [24].

Este modelo en el dominio del tiempo es una herramienta eficaz para predecir el desarrollo del desgaste en una sección de vía específica. Como se describe en [23], los coeficientes de la función de transferencia que se ajustan

a las receptancias medidas se obtienen utilizando el método de la Fracciones Racionales Polinómicas (*Rational Fraction Polynomials*, RFP) [25] en combinación con Algoritmos Genéticos (AG) multiobjetivo. Estos AG multiobjetivo se utilizan para garantizar la estabilidad de la función de transferencia en el tiempo y aumentar la precisión.

En el modelo aquí descrito, las receptancias de la Figura 2 se utilizan como entrada, garantizando una variación suave de los coeficientes de la función de transferencia para mantener la estabilidad del sistema a lo largo del tiempo.

El modelo descrito en [23] considera tanto la dinámica vertical como la lateral, ya que está diseñado para curvas cerradas. En este trabajo se estudia una vía recta, por lo que sólo se considera la dinámica vertical de la vía y del eje montado, reduciendo considerablemente el coste computacional. Además, el modelo mencionado se ha mejorado para incorporar la curva de tracción, dado que el coeficiente de fricción está sujeto a variaciones durante el proceso de tracción, y para tener en cuenta la variación de la dureza del carril en las soldaduras. Así, se ha implementado un coeficiente de fricción y una dureza variables en el modelo desarrollado.

La fuerza de contacto entre la rueda y el carril se calcula mediante el resorte no lineal de Hertz. Para calcular las tensiones tangenciales en la huella de contacto y considerar la curva de tracción en el modelo, se ha adaptado el algoritmo FASTSIM [26] por el FASTSIM modificado desarrollado por Spiryagin y Polach en [10], basado en el modelo anterior de Polach [9]. Así, se ha considerado la reducción exponencial de la fuerza de contacto una vez alcanzada la saturación, en función de la velocidad de deslizamiento. En el artículo citado, Polach considera la variabilidad del coeficiente de fricción ( $\mu$ ), tal y como se representa en la ecuación 1.

$$\mu = \mu_s((1 - A)e^{-Bw} + A) \quad (1)$$

En esta ecuación,  $\mu_s$  es el coeficiente de fricción máximo,  $A$  es la relación entre el coeficiente de fricción a velocidad de deslizamiento infinita y el coeficiente de fricción máximo,  $w$  es la magnitud de la velocidad de deslizamiento y  $B$  representa la disminución exponencial de la curva de fricción [9]. Estos parámetros se ajustan para obtener la curva roja que se muestra en la Figura 5(b).

La no linealidad del contacto se considera según [10], donde se introduce un factor de reducción variable  $k$  en los coeficientes de Kalker (ecuación 2).

$$k = k_0(\alpha_{inf} + \frac{1 - \alpha_{inf}}{1 + \beta\varepsilon}) \quad (2)$$

En la ecuación 2,  $k_0$  es el valor inicial del factor de reducción en valores de pseudodeslizamiento próximos a cero,  $\alpha_{inf}$  es la ratio entre el factor de reducción en valores de pseudodeslizamiento próximos a infinito y el valor inicial de Kalker,  $\beta$  representa la disminución de la rigidez de contacto con el aumento del área de deslizamiento y  $\varepsilon$  es la relación entre el área de deslizamiento y el área de adherencia. El valor de  $\varepsilon$  se obtiene mediante la ecuación 3.

$$\varepsilon = \frac{1}{4} \frac{G\pi ab k_0 c_{11}}{Q\mu} v \quad (3)$$

En esta ecuación,  $G$  es el módulo de cizalladura del acero,  $a$  y  $b$  son los semiejes de la huella de contacto, obtenidos a partir del contacto de Hertz,  $c_{11}$  es un coeficiente de Kalker [27],  $Q$  es la carga de la rueda y  $v$  el módulo del pseudodeslizamiento.

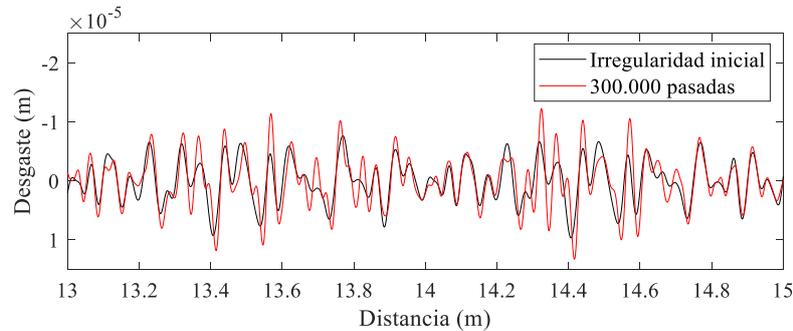
En este trabajo, se ha utilizado el modelo de Archard [21] para obtener el desgaste en la cabeza de carril, que se calcula mediante la ecuación 4. En esta ecuación,  $k_a$  es el coeficiente adimensional de desgaste de Archard,  $p$  es la presión normal de contacto,  $\Delta d$  es la distancia de deslizamiento y  $H$  la dureza del material.

$$\Delta z = k_a \frac{p \Delta d}{H} \quad (4)$$

## 4. Comparación entre los resultados obtenidos del modelo y resultados experimentales

Con el fin de comparar los resultados obtenidos mediante el modelo desarrollado con los de las mediciones experimentales, se han introducido como datos de entrada para el modelo: receptancias, dureza y curva de tracción. Para el cálculo, se ha empleado una irregularidad inicial medida justo después del amolado del carril. A partir de esta irregularidad, se ha calculado el desgaste de la superficie del carril después de 300.000 pasadas de ejes montados, con una actualización del perfil longitudinal de la superficie del carril cada 2.000 pasadas.

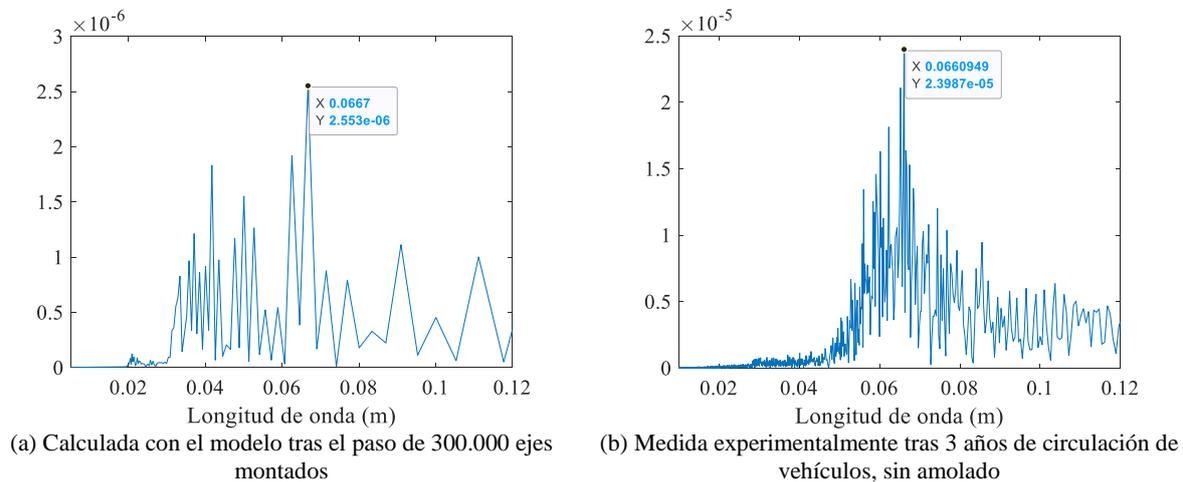
La Figura 6 muestra la irregularidad inicial y el desgaste obtenido tras 300.000 pasadas de ejes montados. En esta figura se han filtrado las longitudes de onda largas (superiores a 15 cm), ya que la longitud de onda predominante de la corrugación desarrollada en esta línea es de unos 6 cm. Por tanto, las longitudes de onda de interés son las cortas, comprendidas entre 3 y 10 cm.



**Figura 6:** Corrugación obtenida con el modelo tras 300.000 pasadas de ejes montados.

Posteriormente, se ha calculado la longitud de onda de la corrugación desarrollada mediante el modelo (Figura 7(a)) y se compara con la longitud de onda de la corrugación medida en 2020, después de 3 años de circulación de vehículos sin la realización de un amolado (Figura 7(b)).

Como se muestra en la Figura 7, la longitud de onda predominante del desgaste ondulatorio en esta sección es de 6,6 cm en ambos casos. Cabe señalar que la Figura 7(a) también muestra un pico en una longitud de onda de 4,1 cm, que no está presente en la Figura 7(b). Es importante señalar que esta longitud de onda estaba presente en la irregularidad inicial, medida experimentalmente tras el amolado. Por lo tanto, esta longitud de onda en particular podría ser una consecuencia del proceso de amolado. Mediciones recientes realizadas 9 meses después de la irregularidad inicial que se muestra en la Figura 6 han confirmado el desarrollo y crecimiento de la longitud de onda de 4,1 cm tras el amolado.



**Figura 7:** Longitudes de onda de la corrugación en la sección estudiada.

Los resultados del modelo muestran que la longitud de onda predominante de 6,6 cm coincide con la corrugación observada después de 3 años sin la realización de un amolado. Además, el modelo predice la corrugación con longitud de onda de 4,1 cm, que se manifestó después del amolado. En consecuencia, el modelo desarrollado se puede aplicar a estudios de corrugación adaptándolos a diferentes líneas.

## 5. Estudio del efecto de diferentes factores en el crecimiento de la corrugación

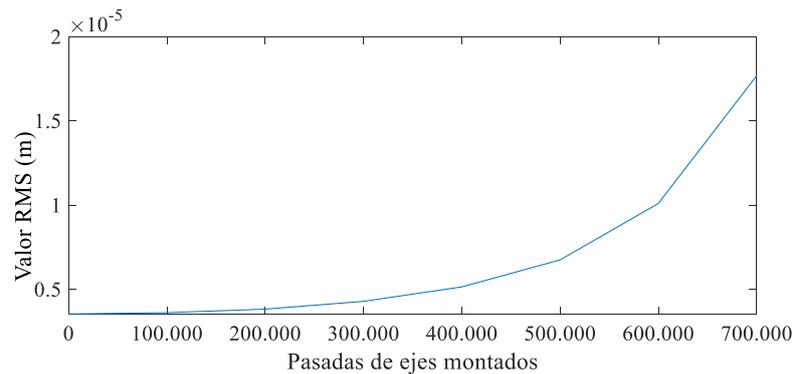
El modelo descrito se ha utilizado para estudiar el efecto de diferentes factores en el crecimiento del desgaste ondulatorio. Los factores estudiados incluyen la frecuencia de amolado, la variación de la dureza en soldaduras y las receptancias variables de la vía.

### 5.1. Frecuencia de amolado

En esta línea de tranvía, el desgaste ondulatorio mostró una gran amplitud, llegando a casi 350  $\mu\text{m}$  después de 3 años sin la realización de un amolado. Este valor es muy elevado y el carril debería haberse amolado antes de que comenzara el crecimiento exponencial. Por lo tanto, se ha utilizado el modelo de predicción para encontrar el límite antes de que esta irregularidad comience a crecer exponencialmente.

Partiendo de la irregularidad medida experimentalmente tras el amolado, se ha calculado el desgaste cada 100.000 pasadas de ejes montados y se ha calculado la evolución del crecimiento de la corrugación para cada una de las pasadas de ejes montados utilizando el valor cuadrático medio (*Root Mean Square*, RMS). Esta evolución se

muestra en la Figura 8, donde la corrugación comienza a crecer casi exponencialmente después de aproximadamente 400.000 pasadas de ejes montados.



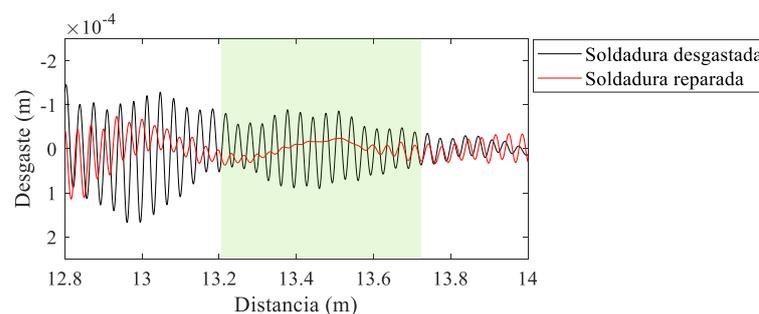
**Figura 8:** Valor RMS cada 100.000 pasadas de ejes montados.

Teniendo en cuenta el resultado de la Figura 8, se han simulado dos escenarios. El primer escenario considera el amolado del carril cada 400.000 pasadas de ejes montados, mientras que el segundo supone que el carril se amola tras 600.000 pasadas. Teniendo en cuenta que un tren amolador de carriles elimina unas 20 micras en una sola pasada, se ha obtenido que sólo se requieren 2 pasadas para eliminar la amplitud de corrugación desarrollada tras 400.000 pasadas de ejes montados. Sin embargo, tras 600.000 pasadas de ejes montados, se requieren al menos 4 pasadas. Por tanto, el coste del amolado tras 1.200.000 pasadas de ejes montados sería mayor cuando la operación de amolado se realiza tras 600.000 pasadas debido a la amplitud que se debe rectificar. Por tanto, en el caso estudiado, con el fin de evitar el crecimiento exponencial de la corrugación del carril, es recomendable realizar operaciones de amolado periódicas cada 400.000 pasadas de ejes montados, lo que reduciría los costes de mantenimiento del amolado que, para dos de las líneas de este Administrador de Infraestructuras, se estiman en torno a los 700.000 € anuales.

### 5.2. Geometría y dureza de las soldaduras

En el siguiente estudio se tiene en cuenta la geometría y dureza de la soldadura y su efecto en el crecimiento de la corrugación tras un número determinado de pasadas de ejes montados. Para ello se han comparado dos situaciones. En primer lugar, se utiliza la geometría de la soldadura desgastada medida experimentalmente (Figura 4(b)) como entrada al modelo para predecir el desgaste. En el segundo caso, se considera una soldadura reparada, esto es, con un saliente de 800  $\mu\text{m}$ , basada en los límites utilizados por el Administrador de Infraestructuras de los Ferrocarriles Vascos.

La Figura 9 muestra el desgaste obtenido tras 600.000 pasadas de ejes montados en cada caso, aproximadamente 1 m después de la posición de la soldadura. Como resultado, se ha concluido que, con una soldadura recién reparada la amplitud del desgaste se reduciría en más del 80%, tal y como se muestra en verde en la Figura 9. Esto demuestra el efecto positivo de la reparación de las soldaduras desgastadas en el crecimiento de la corrugación.



**Figura 9:** Desgaste tras 600.000 pasadas de ejes montados con una soldadura desgastada y una reparada.

### 5.3. Variación de las receptancias de la vía

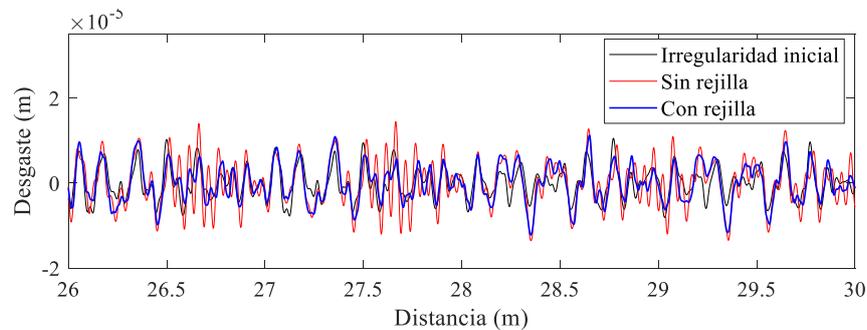
Por un lado, se sabe que cada uno de los cambios en la dinámica de la vía pueden actuar como desencadenantes de la corrugación en los metros siguientes de vía. Por otro lado, se ha demostrado que una variación aleatoria en las propiedades dinámicas de la vía [13] o en la velocidad del tren [28] pueden ayudar a reducir el crecimiento de esta irregularidad.

Para estudiar el efecto de la variación de las propiedades dinámicas de la vía en el crecimiento de la corrugación, se ha calculado el desgaste en dos situaciones. El primer caso considera el efecto de la presencia de una rejilla de

ventilación de una vía ferroviaria soterrada bajo la línea que se está estudiando, y que se muestra en la Figura 1(b). El segundo caso asume propiedades dinámicas constantes, como si la rejilla de ventilación no estuviera instalada en esta sección de la vía. Para modelizar el segundo caso sólo se ha utilizado una receptancia, la que se encontraba a lo largo de la mayor parte de la vía (Figura 2, línea roja).

La Figura 10 muestra el efecto de considerar la rejilla de ventilación tras simular en el modelo 250.000 pasadas de ejes montados. Se puede ver que, cuando la receptancia es constante (sin el efecto de la rejilla de ventilación) la amplitud de la corrugación es mayor. Por el contrario, cuando se considera la variabilidad de las receptancias, la corrugación no crece tan rápidamente.

En este estudio, se ha observado que el cambio dinámico causado por la rejilla de ventilación ha reducido la tasa de crecimiento del desgaste ondulatorio. Este cambio dinámico también puede conseguirse con otras propiedades de la vía, como modificando la rigidez del soporte elástico, como en los estudios de Egana *et al.* [13].



**Figura 10:** Desgaste tras 250.000 pasadas de ejes montados con y sin el efecto de la rejilla.

## 6. Conclusiones

Este artículo se centra en el estudio del crecimiento de la corrugación en una vía de tranvía que presentaba una amplitud significativa, de 350  $\mu\text{m}$ , tras 3 años de circulación de vehículos sin la realización de un amolado. Debido a que esta corrugación produce problemas de ruido y vibraciones en el entorno, se seleccionó una sección representativa de esta vía para su investigación. En este trabajo se presentan las observaciones y mediciones realizadas durante los últimos 6 años.

Con el fin de predecir la corrugación en la sección de vía seleccionada, se ha desarrollado un modelo en el dominio del tiempo que considera la variación de la dinámica de la vía y de la dureza del carril al paso por una soldadura, así como la tracción del vehículo. Los resultados obtenidos con el modelo se han comparado con mediciones experimentales del perfil del carril, mostrando una buena coincidencia de las longitudes de onda desarrolladas en este tramo de vía.

Este modelo se ha utilizado para estudiar el efecto de diferentes factores en el desarrollo y crecimiento del desgaste ondulatorio del carril. Por un lado, se ha observado que, en este caso, la corrugación comenzó a aumentar casi exponencialmente después de 400.000 pasadas de ejes montados. Teniendo en cuenta los costes de amolado, este es el límite propuesto para el amolado preventivo en esta vía. Por otro lado, los resultados obtenidos mediante el modelo muestran que reparar una soldadura (saliente de 800  $\mu\text{m}$ ) reduce significativamente la tasa de crecimiento del desgaste ondulatorio en comparación con el desgaste desarrollado en una soldadura sin reparar. Esto confirma el efecto positivo de reparar una soldadura desgastada en términos de crecimiento de corrugación. Finalmente, se ha estudiado el efecto de la receptancia variable causada por la presencia de una rejilla de ventilación en la vía. En este caso, el modelo de predicción confirma que cuando la vía no tiene propiedades dinámicas constantes, la tasa de crecimiento del desgaste ondulatorio disminuye considerablemente.

## 7. Agradecimientos

Este trabajo se ha financiado en parte por el Ministerio de Investigación español MICINN/Ministerio de Economía y Competitividad MINECO, MCI/AEI y al Fondo Europeo de Desarrollo Regional FEDER-ERDF por la financiación a través del contrato PID2019-109483RB-I00. Los autores también desean agradecer al Gobierno Vasco por su asistencia financiera a través de IT1764-22, KK-2023/00029, y también a Horizon Europe's Rail Joint Undertaking Academics4Rail a través del contrato 101121842. *Views and opinions expressed are however those of the authors only and do not necessarily reflect those of the European Union or Europe's Rail Joint Undertaking. Neither the European Union nor the granting authority can be held responsible for them.*

## 8. Referencias

- [1] Torstensson, P. T., Nielsen, J. C. O., “Monitoring of rail corrugation growth due to irregular wear on a railway metro curve”, *Wear* **267**, 556-561 (2009)
- [2] Vickerstaff, A., Marway, H., Tattersall, D., Vince, R., “Corrugation on London underground: What problem are we trying to solve”, *Proceedings of the 12th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems*, 1-8, Melbourne (2022)
- [3] Suda, Y., Hanawa, M., Okumura, M., Iwasa, T., “Study on rail corrugation in sharp curves of commuter line”, *Wear* **253**, 193-198 (2002)
- [4] Daniel, W. J. T., Horwood, R. J., Meehan, P. A., Wheatley, N., “Analysis of rail corrugation in cornering”, *Wear* **265**, 1183-1192 (2008)
- [5] Wang, Z., Xu, Y., “Analysis of rail corrugation characteristics in the vehicle braking section of metro”, *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering* **47**, 588-595 (2023)
- [6] Chen, P., Zhu, W., Yu, C., Sun, N., Xue, W., “Research on train braking model by improved Polach model considering wheel-rail adhesion characteristics”, *IET Intelligent Transport Systems* **17**, 2432-2443 (2023)
- [7] Egana, J. I., Vinolas, J., Gil-Negrete, N., “Effect of liquid high positive friction (HPF) modifier on wheel-rail contact and rail corrugation”, *Tribology International* **38**, 769-774 (2005)
- [8] Stock, R., Stanlake, L., Hardwick, C., Yu, M., Eadie, D., Lewis, R., “Material concepts for top of rail friction management – Classification, characterisation and application”, *Wear* **366-367**, 225-232 (2016)
- [9] Polach, O., “Creep forces in simulations of traction vehicles running on adhesion limit”, *Wear* **258**, 992-1000 (2005)
- [10] Spiriyagin, M., Polach, O., Cole, C., “Creep force modelling for rail traction vehicles based on the Fastsim algorithm”, *Vehicle System Dynamics* **51**, 1765-1783 (2013)
- [11] Thompson, D., “Chapter 5: Wheel/rail interaction and excitation by roughness”, *Railway Noise and Vibration*, 127-273 (2009)
- [12] Vadillo, E. G., Tárrago, J. A., Garate, G., Duque, C. A., “Effect of sleeper distance on rail corrugation”, *Wear* **217**, 140-146 (1998)
- [13] Egana, J. I., Vinolas, J., Seco, M., “Investigation of the influence of rail pad stiffness on rail corrugation on a transit system”, *Wear* **261**, 216-224 (2006)
- [14] Oyarzabal, O., Gómez, J., Santamaría, J., Vadillo, E. G., “Dynamic optimization of track components to minimize rail corrugation”, *Journal of Sound and Vibration* **319**, 904-917 (2009)
- [15] Correa, N., Vadillo, E. G., Santamaria, J., Gómez, J., “On the study of train-track dynamic interactions caused by rail welds on discrete supported rails”, *Wear* **314**, 291-298 (2014)
- [16] Gómez, I., Vadillo, E. G., “A linear model to explain short pitch corrugation on rails”, *Wear* **255**, 1127-1142 (2003)
- [17] Batten, R. D., Bellette, P. A., Meehan, P. A., Horwood, R. J., Daniel, W. J. T., “Field and theoretical investigation of the mechanism of corrugation wavelength fixation under speed variation”, *Wear* **271**, 278-286 (2011)
- [18] Torstensson, P. T., Pieringer, A., Nielsen, J. C. O., “Simulation of rail roughness growth on small radius curves using a non-Hertzian and non-steady wheel-rail contact model”, *Wear* **314**, 241-253 (2014)
- [19] Correa, N., Vadillo, E. G., Santamaria, J., Herreros, J., “A versatile method in the space domain to study short-wave rail undulatory wear caused by rail surface defects”, *Wear* **352-353**, 196-208 (2016)
- [20] Zhang, S., Cheng, G., Sheng, X., Thompson, D. J., “Dynamic wheel-rail interaction at high speed based on time-domain moving Green's functions”, *Journal of Sound and Vibration* **488**, 115632 (2020)
- [21] Archard, J. F., “Contact and Rubbing of Flat Surfaces”, *Journal of Applied Physics* **24**, 981-988 (1953)
- [22] DIN 50157-1:2020-11, “Metallic materials - Hardness testing with portable measuring devices operating with mechanical penetration depth - Part 1: Test method”, German Institute for Standardisation, 2020
- [23] Robles, R., Correa, N., Vadillo, E. G., Blanco-Lorenzo, J., “Predicting rail corrugation in a real line by means of a fast non-linear vertical and lateral model”, *Wear* **524-525**, 204896 (2023)

- 
- [24] Correa, N., Vadillo, E. G., Santamaria, J., Gomez, J., “A rational fraction polynomials model to study vertical dynamic wheel–rail interaction”, *Journal of Sound and Vibration* **311**, 1844-1858 (2012)
- [25] Formenti, D., Richardson, M., “Parameter estimation from frequency response measurements using rational fraction polynomials (twenty years of progress)”, *Proc. International Modal Analysis Conference* **XX**, 373-382, California (2002)
- [26] Kalker, J. J., “A Fast Algorithm for the Simplified Theory of Rolling Contact”, *Vehicle System Dynamics* **11**, 1-13 (1982)
- [27] Kalker, J. J., “Survey of Wheel-Rail Rolling Contact Theory”, *Vehicle System Dynamics* **8**, 317-358 (1979)
- [28] Meehan, P. A., Batten, R. D., Bellette, P. A., “The effect of non-uniform train speed distribution on rail corrugation growth in curves/corners”, *Wear* **366-367**, 27-37 (2016)