

NOTA TÉCNICA

Estudio del desgaste de carriles en servicio y optimización de su mantenimiento

Amador Quintana-Nicolás^a, Mónica Preciado-Calzada^{b,✉}

^aINECO, Avda. Partenón, 4-6, 28042 Madrid

^bUniversidad de Burgos, Escuela Politécnica Superior, Avda. Cantabria s/n, 09006, Burgos

[✉]Autor para la correspondencia mpreciado@ubu.es

Enviado: 14 Diciembre 2015; Aceptado: 2 Noviembre 2016; Publicado on-Line: 19 December 2016

RESUMEN: Este trabajo estudia el desgaste de los carriles a lo largo del tiempo debido al deslizamiento que ejercen las ruedas de los trenes a su paso. También estudia la influencia que tienen las elevadas cargas soportadas en la microestructura del acero de los carriles. Para ello se han analizado muestras reales de carriles con alto desgaste y otras muestras a las que se ha inducido un desgaste acelerado en laboratorio. Todos los datos experimentales se han validado a través del modelo teórico de Archard, obteniendo relaciones satisfactorias. Esta investigación puede ser aplicada en la planificación de las tareas de conservación de los carriles, optimizando los intervalos de amolado preventivo.

PALABRAS CLAVE: Carril; Desgaste; Ferroviario; Mantenimiento

Citation / Cómo citar este artículo: Quintana-Nicolás, A., Preciado-Calzada, M. (2016) “Estudio del desgaste de carriles en servicio y optimización de su mantenimiento”. *Rev. Metal.* 52(4): e080. doi: <http://dx.doi.org/10.3989/revmetalm.080>

ABSTRACT: *Study on the wearing of rails in service and contribution to maintenance optimization.* This work aims to study the natural wearing of the rails when it comes from the sliding effect of the wheels running on the rail surface. It also studies the influence of the applied high dynamic loads on the microstructure of the rail steel properties. The experimental part analyses real samples obtained from rails removed from the track and some other samples to which a forced wearing has been induced in the laboratory. All experimental data have been validated according to the Archard model of wearing, with satisfactory results. This investigation can be applied on the planning of the maintenance works for the rail, with focus on the optimization of preventive grinding intervals.

KEYWORDS: Maintenance; Rails; Railway; Wear

Copyright: © 2016 CSIC. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Attribution (CC BY) España 3.0.

1. INTRODUCCIÓN

El carril es el elemento más crítico de la vía ya que es el que soporta directamente las fuerzas ejercidas por el paso de los ejes de un vehículo ferroviario. Se produce un contacto metálico de reducida superficie entre la rueda y el carril que toma diferentes morfologías y valores dependiendo de muchos factores. Entre ellos destaca la geometría del trazado – curvas, sobrecanchos, etc.-, el tipo de tráfico, y el estado de conservación tanto de la superficie del carril como de la rueda. Dado que los dos primeros son inherentes al sistema ferroviario en sí, es el último aspecto sobre el que se puede actuar para minimizar su efecto, siempre teniendo en cuenta que se debe buscar un mantenimiento óptimo para alcanzar una seguridad máxima.

Se sabe que la fricción producida entre rueda y carril en la superficie de contacto, unida a los altos valores de presión efectuados en dicho contacto produce una alteración en la cabeza de los carriles. Esta alteración se manifiesta por una gran cantidad de defectos de diferente naturaleza: deformaciones, desgastes, endurecimiento del material, fisuras, roturas, etc. Concretamente, en lo que respecta a las deformaciones y desgastes longitudinales, las tareas de mantenimiento se centran en realizar amolados (esmerilados) periódicos a la superficie de la cabeza del carril con el objetivo de restaurar el perfil original, que es el teóricamente idóneo para el acomodo de la rueda. El intervalo de tiempo más apropiado entre actuaciones es un parámetro que se puede optimizar y para ello se pretende efectuar un camino inverso, es decir, analizar muestras de carril retiradas de servicio y evaluar proceso de deterioro teniendo en cuenta cuáles han sido las condiciones en las que ha trabajado.

El contacto entre las ruedas y los carriles es un problema típico relacionado con la dinámica ferroviaria. Se sabe que la forma cónica que se confiere al conjunto de las dos ruedas produce una oscilación cinemática de los ejes, con una frecuencia determinada. También se conoce que existe un efecto de pseudo deslizamiento entre rueda y carril. El perfil transversal de la rueda y el de los carriles se diseñan para que se puedan acoplar de la mejor manera posible. La gran cantidad de variables que intervienen en el diseño de esta interacción hace que se tengan que tomar una serie de simplificaciones, tanto en la geometría como en el comportamiento mecánico de los diferentes elementos a modelar, para poder obtener unos criterios de diseño apropiados (García y Rodríguez, 1995).

A las variables descritas para el contacto del eje en los carriles hay que añadir el efecto que se produce cuando el trazado es en curva. Se producen una serie de aceleraciones centrífugas y unos esfuerzos de guiado. Estos últimos, son de magnitud importante, ya que se desarrollan entre la parte no suspendida del vehículo y la vía, y son perjudiciales

desde el punto de vista de la conservación del carril al incrementarse la fuerza actuante. Por su parte, las aceleraciones transversales también son perjudiciales en cuanto a desgaste. Por ello, se definen unos límites geométricos a respetar en el diseño de los trazados.

El movimiento relativo entre dos cuerpos, cuando se utiliza la mecánica clásica, es clasificado en dos tipos: rodadura pura sin deslizamiento y deslizamiento puro.

En el caso del desgaste producido entre la rueda y el carril, el par es acero-acero y se tiene un proceso de etapas múltiples en el que se suceden distintos tipos de desgaste (Bayer, 2002).

Archard y Hirst (1956) confirmaron el modo de desgaste de los metales etapa por etapa. A través de sus experimentos, concluyeron que había dos mecanismos de desgaste que podrían operar simultáneamente: transferencia de metal seguida de abrasión y un proceso en una sola etapa de abrasión directa.

Las actuaciones de mantenimiento del carril consisten básicamente en eliminar una capa de metal de la cabeza del carril en el momento preciso y en el lugar adecuado. El procedimiento se llama amolado o fresado del carril. Hoy en día, el mantenimiento del carril se ha convertido en una actividad preventiva. Se eliminan finas capas de metal de la superficie y se controla el perfil adecuado dentro de unas tolerancias estrictas, optimizando de esta manera el contacto entre las ruedas y el carril (Frick y Schoech, 2008). La experiencia demuestra que un perfil de carril nuevo no suele ofrecer las condiciones ideales de contacto, por lo que a lo largo del tiempo el carril y la rueda se van ‘acomodando’.

Finalmente, cabe destacar que estas actividades de mantenimiento pueden ser optimizadas estudiando el desgaste efectivo y reestructurando los periodos de tiempo utilizados para realizar los amolados, siempre manteniendo coeficientes de seguridad suficientes. De hecho, se han realizado diferentes estudios sobre desgaste en condiciones reales con el fin de mejorar tanto las tareas de mantenimiento como la forma de los perfiles (Jendel, 2002; Santa *et al.*, 2016).

Este trabajo pretende estudiar si el desgaste real de los carriles que han sido levantados responde a algún modelo. Se hace especial hincapié en la dificultad para obtener muestras de las que se conozcan datos reales y que hayan estado en tramos con cargas similares.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Muestras a ensayar

Según la normativa europea vigente, UNE-EN 13674-1 (2012), el perfil aceptado tiene que ceñirse a las dimensiones que marca la Fig. 1. De entre

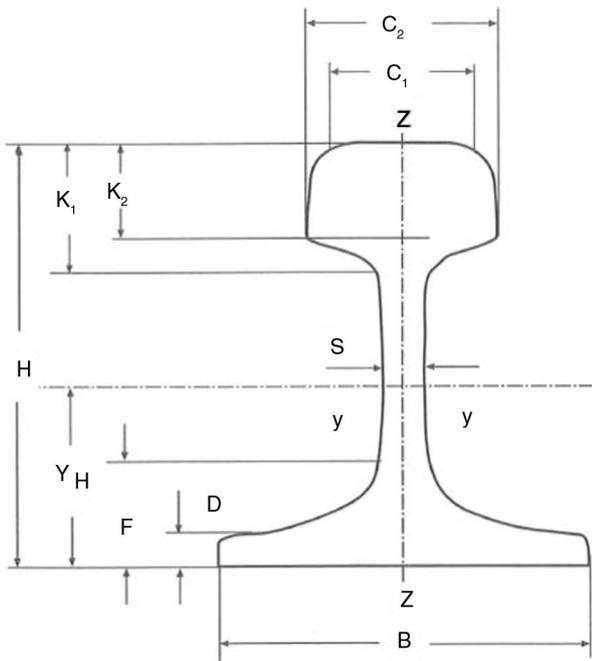


FIGURA 1. El perfil de carril con sus dimensiones geométricas.

ellas, se van a tomar como referencia dos dimensiones fácilmente medibles: la anchura máxima de la cabeza del carril en horizontal, C_2 , y la altura máxima entre la superficie de la cabeza y la base del patín medido en vertical, H . Estas medidas se realizan en todas las muestras y servirán para facilitar el posicionado de las muestras sobre la muestra 0, que va a ser tomada como muestra patrón y consiste en una muestra de un carril que no ha sufrido ningún tipo de desgaste. Las muestras (Fig. 2) que se van a comparar han sufrido desgastes comparables, por las cargas y los lugares en los que se encontraban. (Tabla 1)

Las probetas que van a ser ensayadas se obtienen directamente de las muestras de carril disponibles, extrayendo las piezas por corte y mecanizado. La posición, dimensiones y designación de cada pieza se explican en la Fig. 3.

Cada probeta ha sido utilizada para efectuar ensayos tribológicos, microdurezas y caracterización metalográfica. En el caso de las medidas de microdureza, se han elegido dos zonas (D y E) diferentes para ver la evolución de los valores dependiendo de la curvatura de la cabeza del raíl.

2.2. Modelo de desgaste

El modelo de desgaste seguido es el de Archard (1953) que ha sido utilizado por numerosos autores (Suárez y Vélez, 2005). En este modelo se plantea una variación del desgaste inversamente proporcional a la dureza del material más blando, H y

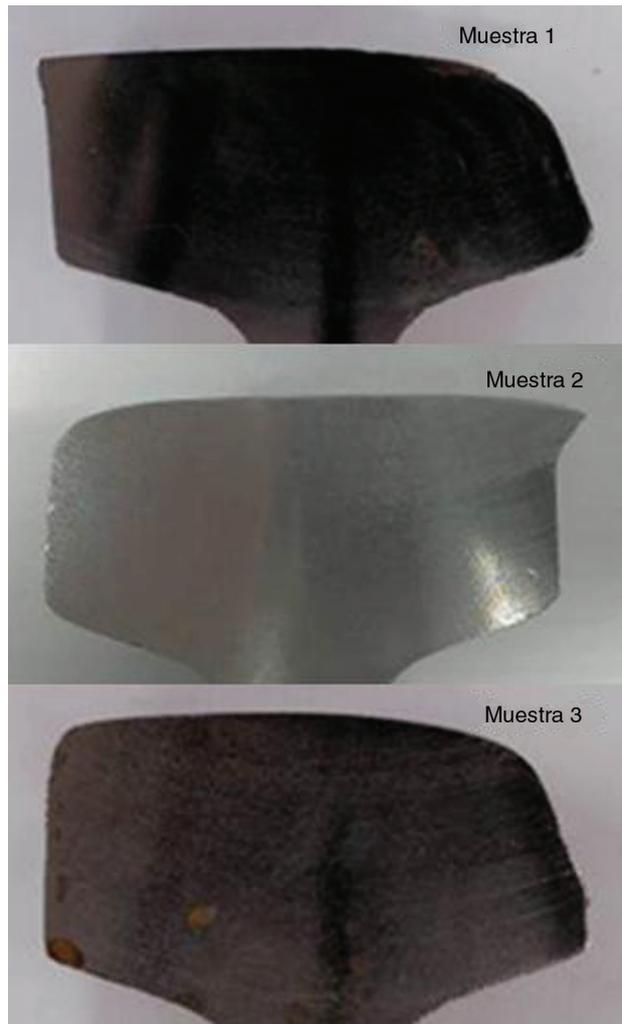


FIGURA 2. Muestras reales de railes (zona correspondiente a la cabeza del raíl).

directamente proporcional a la carga aplicada, N , (Ec. (1)):

$$\text{Volumen desgastado} = \frac{KN}{H}d \quad (1)$$

El término d es la distancia de deslizamiento para producir una cantidad determinada de desgaste, K es una constante que depende del material y de las condiciones del desgaste.

2.3. Metodología

Se ha efectuado una estimación lo más ajustada posible de las condiciones de trabajo que han sufrido las muestras a lo largo de su vida en servicio para estimar la carga aplicada. Mediante cadenas de microdurezas Vickers, se ha podido estimar

TABLA 1. Características de las muestras

| Muestra 0 (2010) | |
|------------------|---|
| Historial | Muestra de carril intacto, sin haber entrado en servicio. Sirve como patrón de geometría y propiedades mecánicas. |
| Dimensiones | C2 = 70 mm; H = 159 mm |
| Muestra 1 (1965) | |
| Historial | Desgaste lateral, deformación plástica y posible transformación estructural severa. Vía con traviesas bibloque. |
| Dimensiones | C2 = 70,5 mm; H = 151,75 mm |
| Muestra 2 (1962) | |
| Historial | Colocado en hilo bajo de una curva. Colocado sobre traviesa bibloque. |
| Dimensiones | C2 = 73,50 mm; H = 149,15 mm |
| Muestra 3 (1988) | |
| Historial | Desgaste lateral severo, colocado en hilo alto curva. Traviesa monobloque. |
| Dimensiones | C2 = 72 mm; H = 154,30 mm |

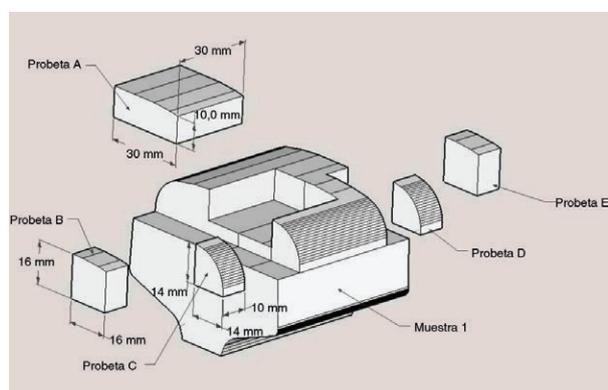


FIGURA 3. Croquis de extracción de probetas para los diferentes ensayos.

la dureza media de las distintas muestras, las cuales han ido sufriendo sucesivo desgaste y por lo tanto endurecimiento por deformación y por último se ha aplicado la ley de Archard para obtener el valor de la constante K de cada muestra

Para la caracterización metalográfica de los carriles desgastados, se ha observado el cambio de la microestructura en profundidad de las distintas muestras.

Por último, para calcular la cantidad de material eliminado en el área de contacto rueda/carril que se ha introducido en la Ec. (1), se han realizado fotografías de alta resolución de cada muestra, en sentido perpendicular a la superficie refrentada y con una referencia de longitud. A continuación se tratan las fotografías de las muestras de tal manera que se resalten los bordes. Se ha empleado el software de tratamiento fotográfico libre ImageJ.

Tomando como referencia el contorno de un perfil de carril nuevo del mismo tipo, se escalan ambas imágenes y se superpone el contorno nuevo sobre la imagen de la muestra. Para facilitar el posicionamiento en la superposición de imágenes, se señala

el eje central de cada pieza donde es posible, y las líneas que definen los dos planos bajo la cabeza del carril, con la hipótesis de que la geometría en esa zona no ha sufrido apenas modificación y puede ser tomada como referencia.

Con el programa de análisis de imagen se delimitan las áreas de interés – tanto material eliminado como material rebosante por deformación- y se miden en mm^2 .

3. RESULTADOS

El resultado de los volúmenes desgastados por unidad de longitud en las muestras reales se resume en la Tabla 2.

La medida de durezas se hace siguiendo una línea recta perpendicular a la superficie de rodadura. Los resultados obtenidos para las diferentes probetas se resumen en la Tabla 3. Las probetas marcadas con E corresponden a la parte superior del raíl mientras que las marcadas con D corresponden a la parte curva. Se han efectuado mediciones de dureza Vickers con carga de 300 g. Estas medidas se han transformado posteriormente a valores de dureza Brinell (HBW). Se observa un mayor endurecimiento en la parte superior en los carriles correspondientes a las muestras 1 y 3, que coinciden en el desgaste lateral acusado. La zona lateral, D , presenta una dureza inferior al estar siendo desgastada intensamente mientras que la superior se va endureciendo. Lo contrario ocurre en la muestra 2 en la que el desgaste es vertical. Para calcular la media del valor de dureza que se utiliza en los cálculos, se ha hecho para carril la media de los dos primeros valores de microdureza, ya que esta se corresponde con la distancia a la que se observan cambios microestructurales.

Se han micrografiado las diferentes muestras siguiendo el mismo camino que el efectuado para

TABLA 2. Comparativa de resultados en relación con esfuerzos soportados y tráfico

| | Muestra 1 | Muestra 2 | Muestra 3 |
|---|---|--|---|
| Antigüedad (años) | 49 | 52 | 26 |
| Esfuerzos soportados | Desgaste lateral (hilo alto de una curva o similar) | Desgaste vertical (hilo bajo de curva o similar) | Desgaste lateral (hilo alto de una curva o similar) |
| Valor de dureza (HBW) | 328 | 289 | 291 |
| % incremento respecto a nominal | 26,15 | 11,15 | 11,92 |
| Carga total (10 ⁶ Tm) | 53,38 | 54,52 | 39,33 |
| Área de material eliminado (mm ²) | 500 | 346 | 323 |

TABLA 3. Microdurezas verticales y laterales de las muestras de raíles

| Huella | Distancia a superficie (µm) | 1D | 1E | 2D | 2E | 3D | 3E |
|--------|-----------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | | HBW | HBW | HBW | HBW | HBW | HBW |
| 1 | 125 | 298 | 356 | 304 | 289 | 277 | 327 |
| 2 | 350 | 320 | 338 | 283 | 289 | 262 | 319 |
| 3 | 500 | 321 | 336 | 298 | 289 | 269 | 293 |
| 4 | 1000 | 263 | 311 | 287 | 289 | 239 | 294 |
| 5 | 1500 | 278 | 313 | 296 | 284 | 256 | 275 |
| 6 | 4000 | 244 | 273 | 286 | 276 | 235 | 243 |
| 7 | 7000 | 242 | 262 | 255 | 221 | 220 | 245 |

las cadenas de microdureza. Se han tomado micrografías a 100 aumentos de los aproximadamente 14 mm que tienen de ancho. Cada micrografía cubre aproximadamente 1 mm de longitud. Se ha realizado un montaje de todas las imágenes para poder observar el aspecto de los componentes a lo largo de la sección. En las composiciones se cubren aproximadamente 7 mm, longitud suficiente para observar los cambios citados (Fig. 4).

Para aplicar la ley de Archard, se ha de comprobar la correspondencia de los efectos observados en las muestras con el tráfico que ha circulado. En el caso de los ensayos reales, se considera un valor ponderado de carga en cada rueda teniendo en cuenta la distribución de vehículos ferroviarios que circulan por el tramo de ensayo; se analizan las toneladas de trenes de larga distancia, media distancia, cercanías, mercancías y servicio, a continuación se ponderan sus cargas por la frecuencia y se divide por el número de ruedas. El valor obtenido es de 61741 N.

En cuanto a la distancia de deslizamiento, puesto que se está trabajando con valores unitarios de desgaste (área trasversal eliminada en cada pasada) se ha obtenido este valor calculando el número de pasadas por el carril a lo largo de su vida útil. Para ello se conoce la fecha de instalación, y se estima el tráfico que ha pasado, considerando una tasa de

incremento del tráfico ferroviario del 3,5% anual a lo largo de los años en que ha estado instalado el carril. En un tramo estándar que ha sido Briviesca-Pancorbo (dos pueblos con un tráfico representativo en la provincia de Burgos) se ha visto para los anteriores tipos de trenes, el número de pasadas semanales en el año 2014. Este valor ha sido de 6849 que multiplicado por el número de semanas al año dejaría un valor de 356154 pasadas anuales. Si vamos sumando las pasadas de los años anteriores hasta el año de instalación de cada vía disminuyendo el número de trenes en el porcentaje estimado, se obtiene el número de pasadas por muestra que vamos a considerar d.

En la Tabla 4 se pueden observar los diferentes datos y el cálculo de la constante de proporcionalidad K de la fórmula de Archard.

4. DISCUSIÓN

Los ensayos de microdureza en las muestras han arrojado unos resultados en los que se puede observar en general un gran incremento de la dureza en los 2000 µm desde el borde superior. Se llegan a alcanzar valores del entorno de 330 HBW, cuando el valor nominal del carril estudiado es 260 HBW (con una horquilla de 260–300). Este endurecimiento se puede deber a las grandes cargas ejercidas por el

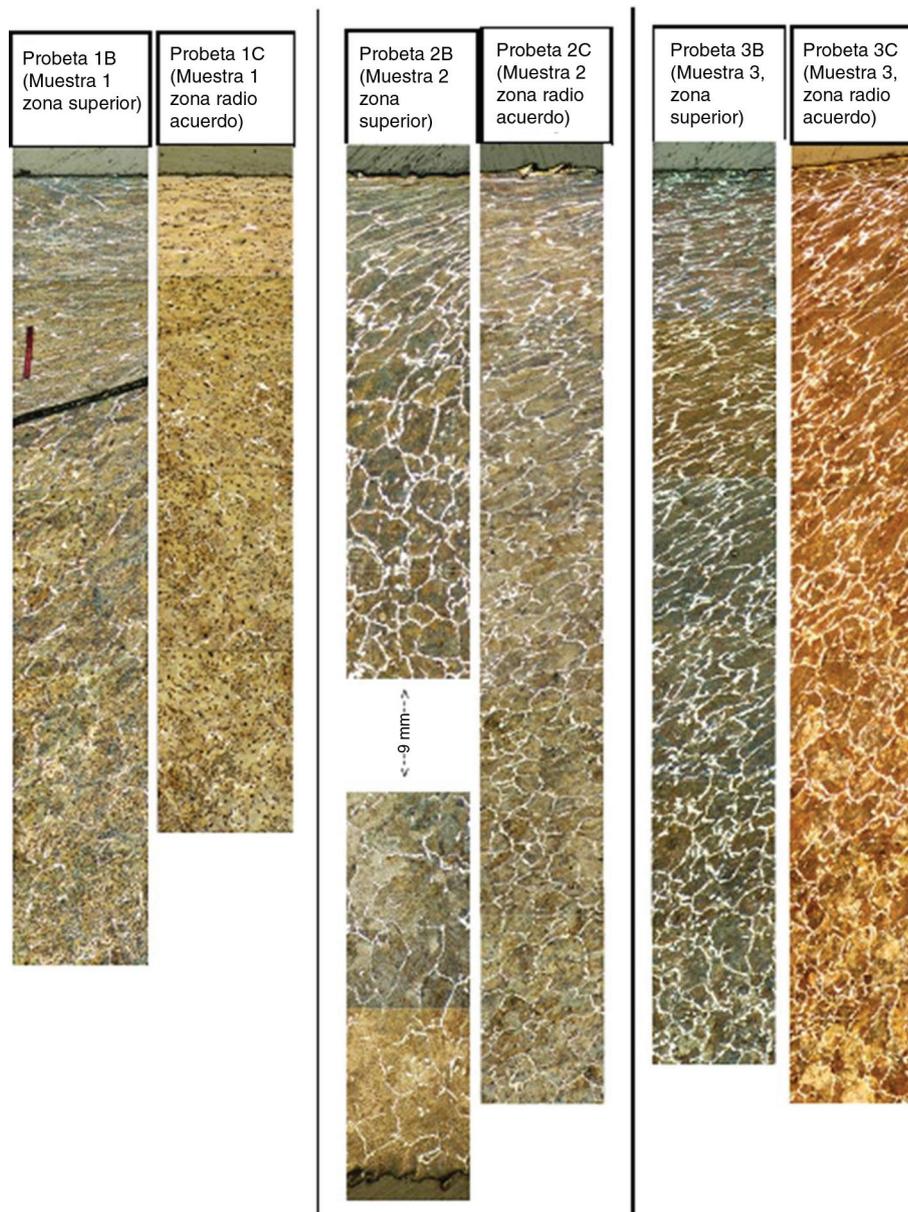


FIGURA 4. Micrografías de las muestras, 100X. Ataque con Nital.

TABLA 4. Cálculo de la constante K de Archard para muestras de raíles reales

| Año | Muestra | Carga (N) | Area (mm ²) | Hardness medio (HBW) | d unitaria (pasadas) | K |
|------|---------|-----------|-------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 1965 | 1 | 61741 | 500 | 328 | 8646190 | 3,07x10 ⁷ |
| 1962 | 2 | 61741 | 346 | 289 | 8831105 | 1,83x10 ⁷ |
| 1988 | 3 | 61741 | 323 | 291 | 6371717 | 2,39x10 ⁷ |

paso de las ruedas, que han producido una deformación de la capa cercana a la superficie. En el proceso de desgaste de los raíles, existe una relación entre el endurecimiento superficial y un incremento en la fragilidad y aparición de fisuras que progresan hacia

la superficie y el carril se va desgastando (Nielsen *et al.*, 2015).

Sin embargo, se pueden distinguir ciertas variaciones entre unas muestras y otras comparando los resultados obtenidos para cada muestra con los

esfuerzos soportados y con el tráfico (toneladas y carga por eje) que ha circulado.

Se puede observar que la muestra 1 y la muestra 3 - que han trabajado de manera similar, esto es, sufriendo un desgaste combinado lateral/vertical-, guardan cierta correlación en el incremento de la dureza. La muestra 1 ha estado en servicio el doble de tiempo, incrementando su dureza un 26%, mientras que la muestra 3 ha incrementado un 11,9% su dureza respecto al teórico de 260 HBW con que se instala.

En términos generales, este endurecimiento se puede deber a las grandes cargas ejercidas por el paso de las ruedas, que han producido una deformación de la capa cercana a la superficie, tal y como se puede observar en las micrografías realizadas.

En relación a los ensayos de desgaste, el valor medio de K es de $2,43178 \times 10^{-7}$ con una dispersión de valores que es mínima si se tiene en cuenta la dificultad de las aproximaciones de carga y distancia de deslizamiento real, además de las variaciones de la dureza que se van produciendo. Este valor es muy esperanzador de cara a poder predecir el desgaste y optimizar el mantenimiento de las vías que era el principal objetivo de este estudio.

Una de las incógnitas que han quedado resueltas es la profundidad a la que afecta la deformación producida por las cargas sobre la superficie de rodadura del carril. Se ha calculado una media de 1500 μm de distancia de influencia desde la superficie de contacto. Para ello se han tenido en cuenta los valores de dureza medidos y el estudio de las micrografías.

En la documentación técnica empleada comúnmente, se establece algunos valores límite para efectuar un amolado, principalmente relacionados con la aparición de defectos puntuales como fisuras o desgaste ondulatorio. En el caso del desgaste longitudinal, se indican amolados para asegurar un perfil de rodadura idóneo y también para evitar que se cree una capa endurecida y evitar el desarrollo trasversal de la fisura. En el caso del amolado, cada pasada puede eliminar entre 0,2 y 0,3 mm de material; en el caso del fresado, se eliminan espesores de 0,5 y 1 mm por pasada.

5. CONCLUSIONES

- Es muy importante disponer de muestras reales de carriles en servicio para investigar los efectos de la interacción entre la vía y los vehículos, ya

que en las simulaciones experimentales es difícil incluir todas las variables.

- Los carriles sufren una deformación de su microestructura en la cara en contacto con la rueda; asimismo se produce un incremento de dureza cuyos valores son elevados y que deben vigilarse para evitar la aparición de defectos graves. Se debe eliminar la capa endurecida a tiempo.
- El modelo propuesto por Archard es válido para este caso de desgaste, pudiéndose definir una constante común para diferentes casos que puede ser introducida en cálculos predictivos en el futuro.
- Las diferencias del valor de la constante pueden deberse a diversos factores ya que las condiciones reales exactas en las que ha trabajado el carril son difíciles de precisar.
- Los valores de desgaste y la posible estimación del desgaste en el futuro pueden ser utilizados por los servicios de mantenimiento de las Administraciones Ferroviarias para programar sus tareas de amolado de carril, optimizando el uso de la maquinaria y alargando la vida útil de los carriles.

REFERENCIAS

- Archard, J.F. (1953). Contact and rubbing of flat surfaces. *J. Appl. Phys.* 24 (8), 981–988. <http://dx.doi.org/10.1063/1.1721448>.
- Archard, J.F., Hirst, W. (1956). The wear of metals under unlubricated conditions. *Proc. R. Soc. Lond. A* 236, 397–410. <http://dx.doi.org/10.1098/rspa.1956.0144>.
- Bayer, R.G. (2002). *Wear Analysis for Engineers*, HNB Publishing, New York, USA.
- Frick, A., Schöech, W. (2008). *Target profiles for grinding: A never ending story*, ARM – Conference, Chicago. <http://interfacejournal.com/archives/415>.
- García, J.M., Rodríguez, M. (1995). *Desvíos ferroviarios*. Ed. Ingeniería Cantabria, SA, España.
- Jendel, T. (2002). Prediction of wheelprofile wear-comparison with field measurements. *Wear* 253 (1-2), 89–99. [http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1648\(02\)00087-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1648(02)00087-X).
- Nielsen, J.C.O., Pålsson, B.A., Torstensson, P.T. (2015). Switch panel design based on simulation of accumulated rail damage in a railway turnout, *10th International Conference on Contact Mechanics*, CM2015, Colorado Springs, Colorado, USA.
- Santa, J.F., Toro, A., Lewis, R. (2016). Correlations between rail wear rates and operating condition in a commercial railroad. *Tribol. Int.* 95, 5–12. <http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2015.11.003>.
- Suárez, F.A., Vélez, J.M. (2005). Estudio del modelo de desgaste propuesto por Archard. *Dyna* 72 (146), 27–43.
- UNE-EN 13674-1 (2012). Aplicaciones ferroviarias. Vía. Carriles. Parte 1: Carriles Vignole de masa mayor o igual a 46 kg.m⁻¹.