



Defectología y métodos de ensayos no destructivos aplicados a ruedas y ejes

Ingeniería Ferroviaria

**Mag. Ing. Rodrigo Romero
Dr. Javier Fava**

2019

Defectología y métodos de ensayos no destructivos aplicados a ruedas y ejes ferroviarios

Alcance

Este informe tiene como objetivo presentar el estado del arte de los métodos de ensayos no destructivos (END) aplicados en la industria ferroviaria, destinados a la inspección de ruedas y ejes. Para ello, previamente haremos una introducción en donde se cubrirán temas respecto al vínculo mecánico entre las ruedas, ejes y el resto del vehículo. Posteriormente se presenta la metalurgia involucrada en el proceso de fabricación de estos componentes, para luego estudiar los distintos tipos de defectos que se presentan en éstos y su origen; y en este marco finalmente presentar los métodos de END que se aplican, ya sea como tareas de mantenimiento rutinario o como nuevos métodos de estudio a nivel de laboratorio.

1. Introducción

De los distintos tipos de transportes terrestres que conocemos y que estamos habituados, los vehículos ferroviarios, cuyo nacimiento está ligado a la revolución industrial, se diferencian en que su dirección es proporcionada por la vía. Los rieles de las vías férreas no son sólo elementos portantes de carga, la cual se transmite a través de las ruedas, sino que también actúan de guía en la dirección lateral.

Uno de los sistemas más importantes en los ferrocarriles es el tren de rodaje. Este sistema es el encargado de proporcionar el movimiento seguro del vehículo a lo largo de las vías. A su vez, un tren de rodaje montado en una estructura independiente que puede girar con respecto al cuerpo del vehículo es conocido como bogie, ver Figura 1: Chasis de Bogie. Dependiendo del diseño del mecanismo de rodadura y del tipo de aplicación (carga o pasajeros), los vehículos pueden estar provistos o no de bogies. El término “bogie” es más extendido en el ámbito ferroviario que el castellanizado “boje”. De todas formas ambos términos son aceptados por la Real Academia Española de la Lengua.

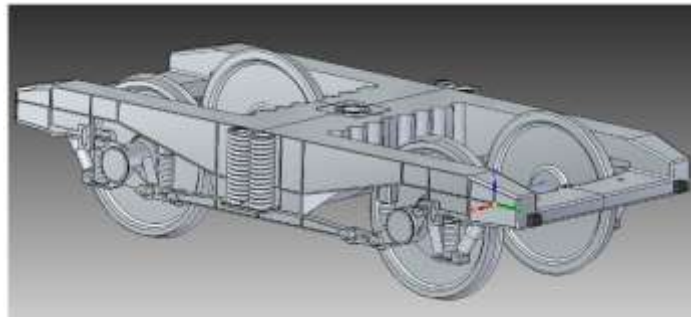


Figura 1: Chasis de Bogie [1].

El sistema del tren de rodaje incluye componentes tales como juegos de ruedas (par de ruedas acopladas al eje), cajas de grasa (o mejor llamada cajas de eje), la suspensión elástica, los frenos, la tracción y los dispositivos para transmitir las fuerzas de tracción y frenado al cuerpo del vehículo. Todos estos elementos se encuentran montados sobre una estructura principal la que se conoce como bastidor o chasis. Las principales funciones del tren de rodaje son las siguientes:

- Transmitir y distribuir la carga vertical de las ruedas del vehículo a los rieles.
- Guiar del vehículo a lo largo de la vía.
- Controlar las fuerzas dinámicas debidas al movimiento por irregularidades del riel, en curvas, agujas y después de impactos entre vehículos.
- Amortiguación eficaz de movimientos oscilatorios.
- Aplicación de las fuerzas de tracción y frenado.

En vehículos sin bogies tanto la suspensión como los frenos y los equipos de tracción se montan en el bastidor del vehículo. Las fuerzas de tracción como las de frenado se transmiten a través de barras de tracción o guías de la caja de ejes. En el caso de que se traten de vehículos convencionales de dos ejes, durante las curvas cerradas se generarán mayores esfuerzos que en los vehículos equivalentes con bogies, por lo que su longitud es limitada [**Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, 3].

Dependiendo del número de juegos de ruedas que se unen al bogie podemos clasificar a estos últimos. El tipo más común es el de dos ejes pero a menudo encontramos también bogies de tres y cuatro ejes, sobre todo en locomotoras. Antiguamente, los bogies simplemente permitían el movimiento del tren de rodaje en un

plano horizontal respecto al cuerpo del vehículo y con ello los juegos de ruedas presentaban ángulos de ataque menores en las alineaciones curvas. Los bogies modernos tienen una estructura que les permite transmitir todos los esfuerzos longitudinales, horizontales y verticales desde el cuerpo del vehículo a las ruedas. Esta estructura o bastidor se equipa además con los dispositivos de frenado, tracción, suspensión y amortiguación; y en ella se pueden instalar también elementos de control de inclinación, de lubricación del contacto rueda-riel y mecanismos para facilitar el posicionamiento radial de las ruedas en las curvas. Los vehículos provistos de bogies son normalmente más pesados que los vehículos de dos ejes sin bogies, sin embargo, su diseño suele ser más simple lo que se traduce en una mayor fiabilidad y facilita su mantenimiento.

Para explicar en forma sencilla el funcionamiento del bogie de eje simple y el de dos ejes se recurre a un croquis explicativo extraído de [1].

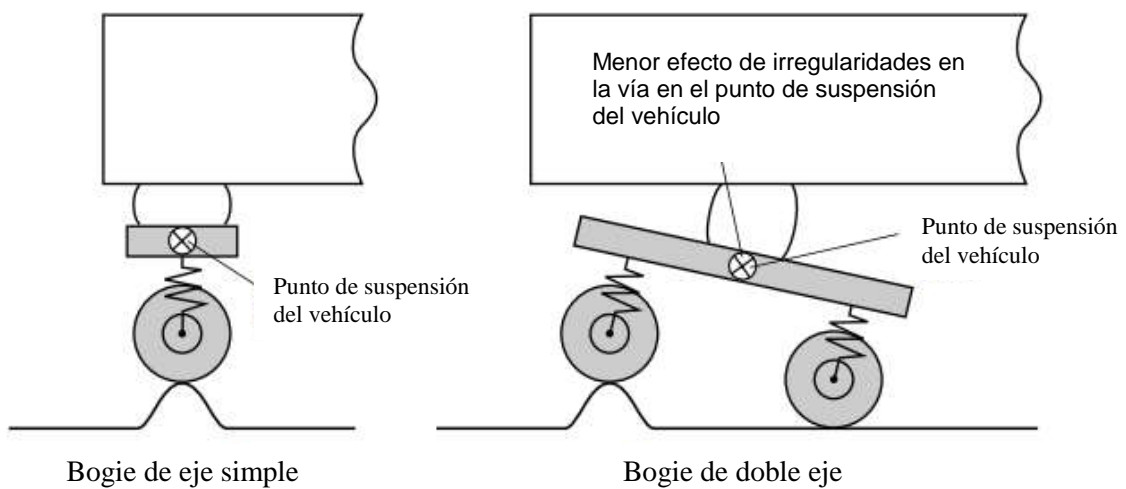


Figura 2: Comparación del efecto de irregularidades en la vía entre un bogie de eje simple y un bogie de dos ejes [1].

1.1. Componentes del bogie

A. Bastidor

Es la estructura de acero de fundición que conforma el bogie. Sirve de soporte para todos los elementos del tren de rodadura.

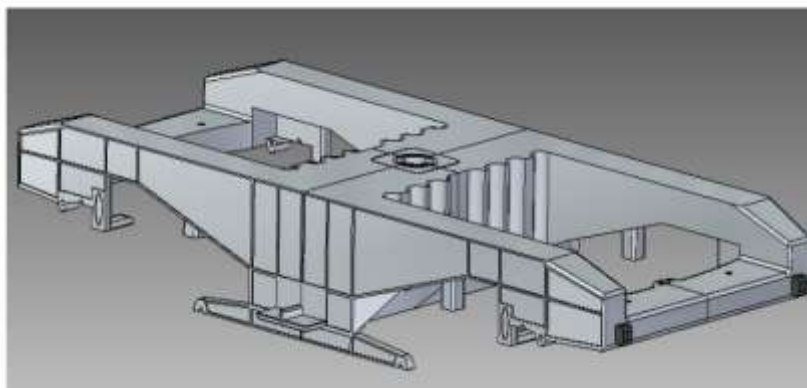


Figura 3: Bastidor [1].

B. Juegos de ruedas

Un juego de ruedas, o también conocido como par montado, está compuesto por dos ruedas rígidamente conectadas mediante un eje común. El juego de ruedas está apoyado sobre cojinetes (rodamientos), los cuales se montan en el eje. El juego de ruedas proporciona al vehículo lo siguiente:

- La distancia necesaria entre el vehículo y la vía.
- El guiado que determina el movimiento dentro del ancho de vía, incluso en curvas y agujas.
- El medio de transmisión de la tracción y las fuerzas de frenado a los rieles para acelerar y decelerar el vehículo.

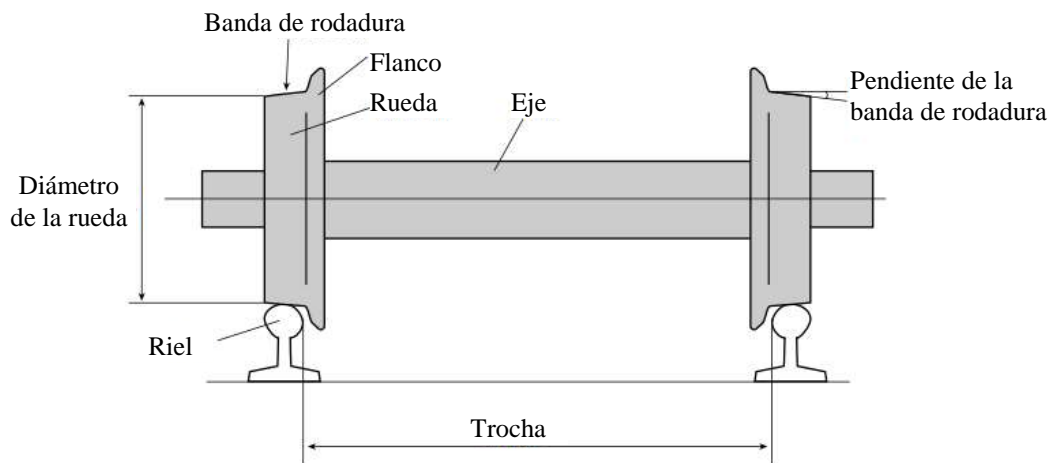
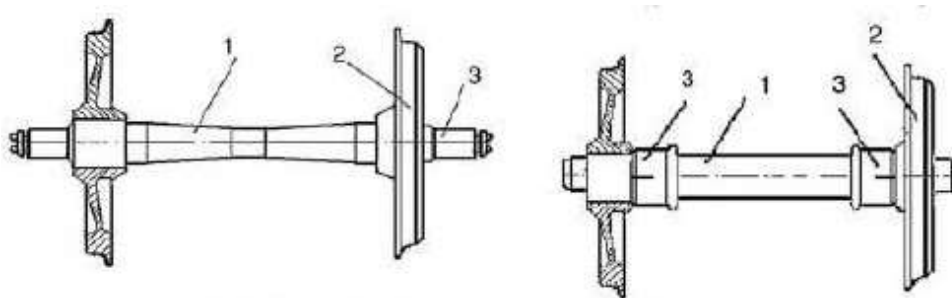


Figura 4: Par de ruedas montado [].

A su vez el diseño del juego de ruedas depende de:

- El tipo de vehículo (de tracción o remolcado).
- El tipo de sistema de frenos utilizado (zapata, freno de disco en el eje, o freno de disco en la rueda).
- La construcción del centro de la rueda y la posición de los cojinetes en el eje (por dentro o por fuera).
- El interés de limitar las fuerzas de alta frecuencia mediante el uso de elementos resistentes entre el centro de la rueda y la llanta.

Los principales tipos de diseño de juegos de ruedas se muestran en la Figura 5. A pesar de la variedad de diseños, todos estos juegos de ruedas tienen dos características comunes: la conexión rígida entre las ruedas a través del eje y el perfil transversal de la superficie rodante de la rueda, llamado perfil de la rueda.



(a) Juegos de ruedas con cojinetes internos y externos

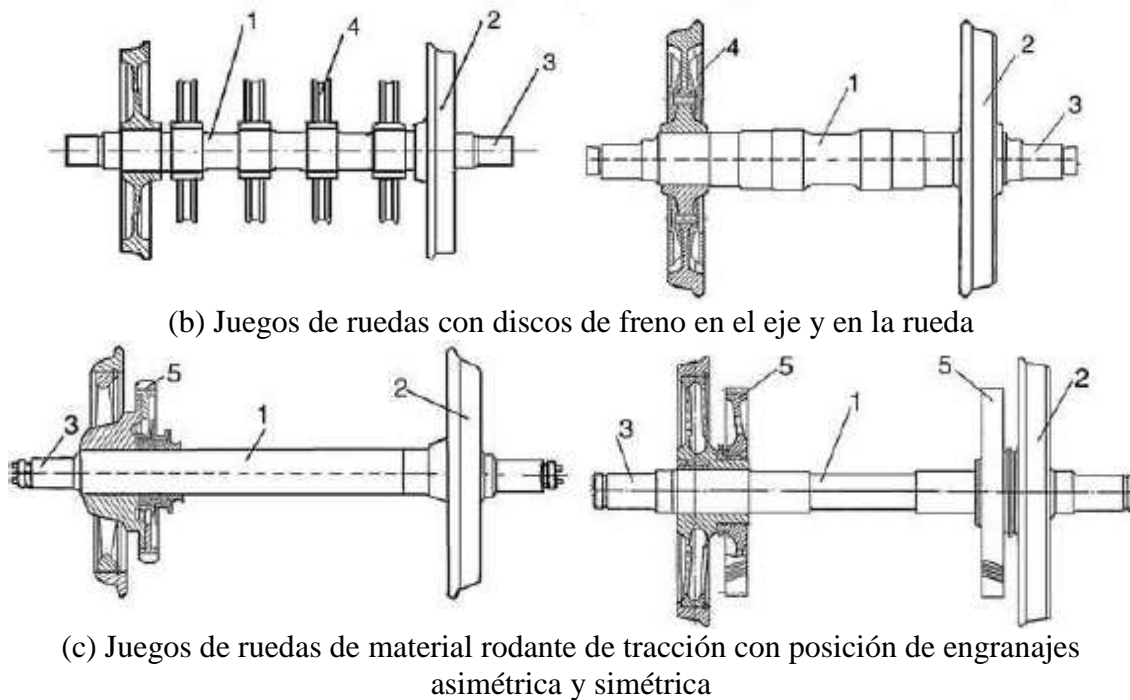


Figura 5: Diseños comunes del juego de ruedas (1: Eje; 2: Rueda; 3: Cojinete; 4: Disco de freno; 5: Engranaje de diente) [3].

C. Cajas del eje (o cajas de grasa)

La caja del eje es el dispositivo que permite que el juego de ruedas pueda girar al proporcionar el alojamiento del cojinete y, al mismo tiempo, los soportes para que la suspensión primaria sujete el juego de ruedas al chasis del vehículo. La caja del eje transmite las fuerzas longitudinales, laterales y verticales desde el juego de ruedas a los demás elementos del bogie. Las cajas del eje se clasifican de acuerdo con:

- Su posición sobre el eje dependiendo de si los cojinetes están dentro o fuera.
- El tipo de cojinete utilizado, que puede ser rodamiento de rodillos o de fricción.

La forma externa de la caja del eje se determina por el método de conexión entre la caja del eje y el bastidor del bogie y su objetivo es lograr una distribución uniforme de las fuerzas en el cojinete.

En un cojinete de fricción las fuerzas verticales y longitudinales se transmiten a través de la superficie interna del cojinete y las fuerzas laterales por sus caras. Este tipo de cajas de eje de cojinete de fricción se han quedado hoy en día obsoletas ya que presentan varias desventajas importantes como son: elevado coeficiente de fricción cuando se inician desde el reposo, poca fiabilidad, necesitan un mantenimiento intensivo, contaminan el medio ambiente, etc.

En la Figura 6 podemos observar un esquema de una caja de eje con cojinete de fricción. Este tipo de cajas de eje tienen como componentes la carcasa (1), el propio cojinete (2) que generalmente está hecho de aleación con bajo coeficiente de fricción, el cojinete (3) que transmite las fuerzas desde la carcasa de la caja del eje hasta el cojinete, un dispositivo de lubricación (4) que engrasa el eje del cojinete. Sellado delantero y trasero (5 y 6) para evitar que entre suciedad o cuerpos extraños en la caja del eje, el sellado delantero (6) se puede retirar para comprobar el estado de los rodamientos y añadir lubricante.

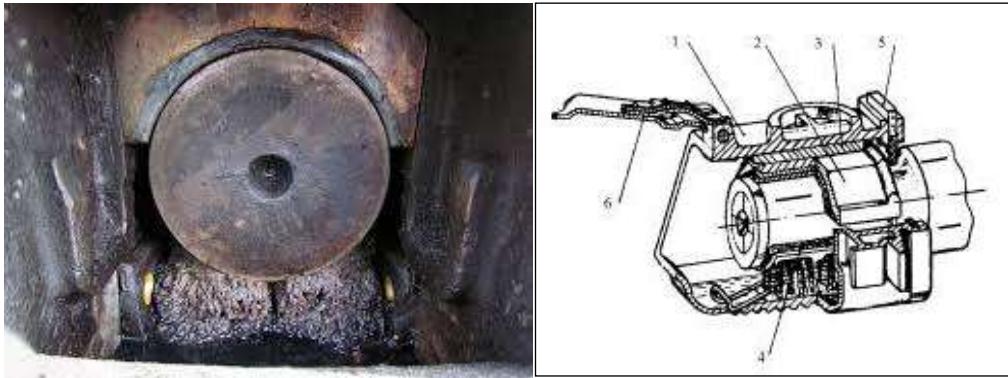


Figura 6: Diseño de una caja de eje con cojinete de fricción [3].

En la Figura 7 podemos observar varios tipos de cajas de eje con cojinetes de rodamientos de rodillo. Este tipo de cojinetes se clasifican de acuerdo con:

- El tipo de rodamiento (cilíndrico, cónico, esférico).
- El método de ajuste (ajuste de presión, ajuste por contracción, ajuste por cojinete o de tapón)

El factor principal que determina la construcción de la caja del eje es la forma en que experimenta las fuerzas axiales y distribuye la carga entre los rodillos.

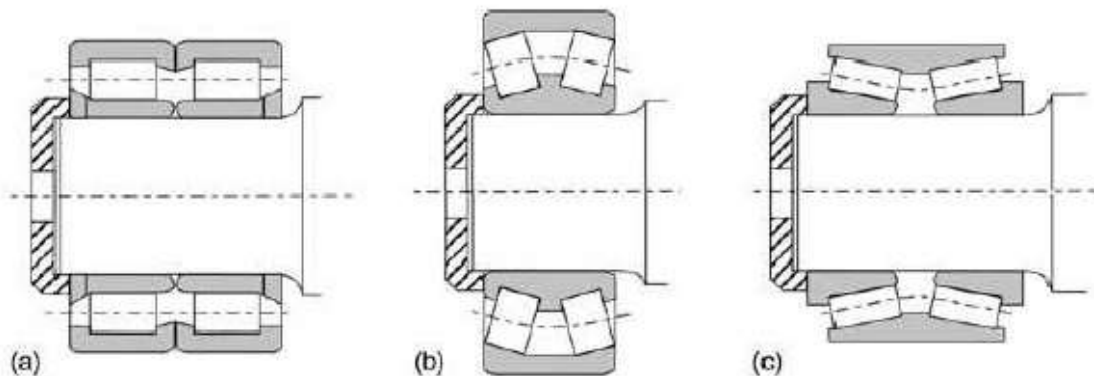


Figura 7: Diseños de rodamientos de rodillos (a) Cilíndrico de dos hileras, (b) Autoalineado de una hilera, (c) Cónico de dos hileras[3].

Los rodamientos de rodillos cilíndricos (a) tienen una gran capacidad dinámica en la dirección radial pero no para transmitir fuerzas axiales. Los rodamientos de rodillos cónicos (b) y (c) transmiten las fuerzas axiales a través de la superficie cilíndrica debido a la inclinación de su eje de rotación. Aunque también presentan ciertos inconvenientes este tipo de rodamientos son los más utilizados hoy en día.

Los rodamientos de rodillos esféricos no son muy utilizados debido a su alto coste y su baja capacidad de carga, pero sin embargo presentan una importante ventaja respecto al resto en cuanto a su mejor distribución de la fuerza delantera y trasera. Los rodamientos de bolas son, sin embargo, a menudo combinados con los rodamientos cilíndricos para transmitir fuerzas axiales. El material rodante de alta velocidad a menudo está provisto de tres tipos de rodamientos en la caja del eje: dos para transmitir las fuerzas radiales y otro (generalmente un rodamiento de bolas) para trabajar axialmente.

D. Ruedas

Las ruedas y los ejes son las partes más críticas del material rodante ferroviario. Su fallo mecánico o un exceso de sus dimensiones de diseño pueden causar el descarrilamiento. Un esquema indicando sus partes principales se muestra en la Figura 8.

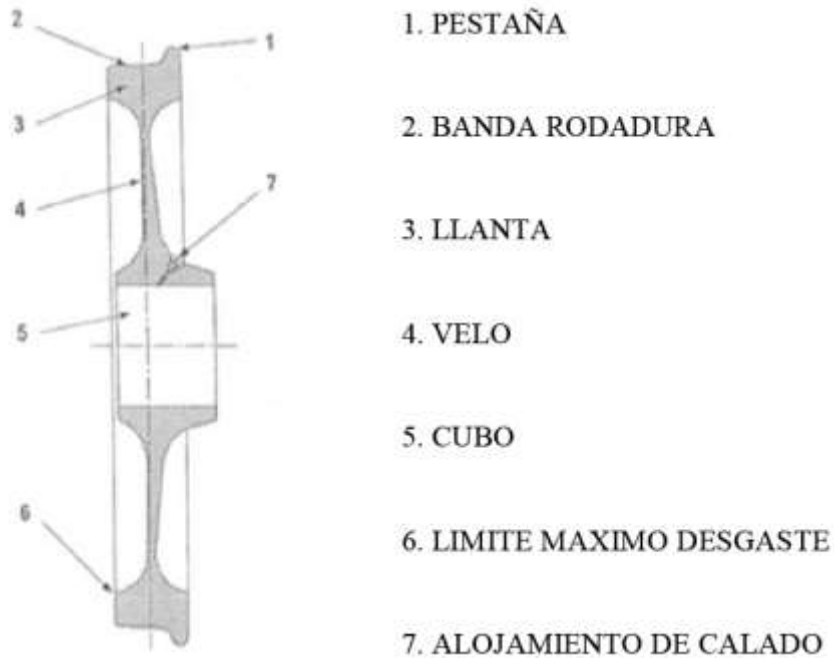


Figura 8: Partes principales de una rueda [2].

Las ruedas se clasifican en macizas, con llantas y ensambladas, como se muestra en la Figura 9 9.

Las ruedas macizas tienen tres elementos principales: la llanta, el disco y el eje, y comúnmente difieren en la forma del disco que puede ser recto, cónico, en forma de S, con radios o corrugado. Las ruedas con llantas se equipan con una llanta ajustada al disco de la rueda que puede ser reemplazada cuando alcanza su límite máximo de rodaje. Con el objeto de reducir las fuerzas de interacción rueda-riel mediante la reducción de la masa no suspendida se han desarrollado ruedas ensambladas con componentes flexibles, que incorporan una capa de material con bajo módulo de elasticidad (goma, poliuretano). Esto ayuda a atenuar la actuación de las fuerzas de alta frecuencia en el contacto rueda – riel.

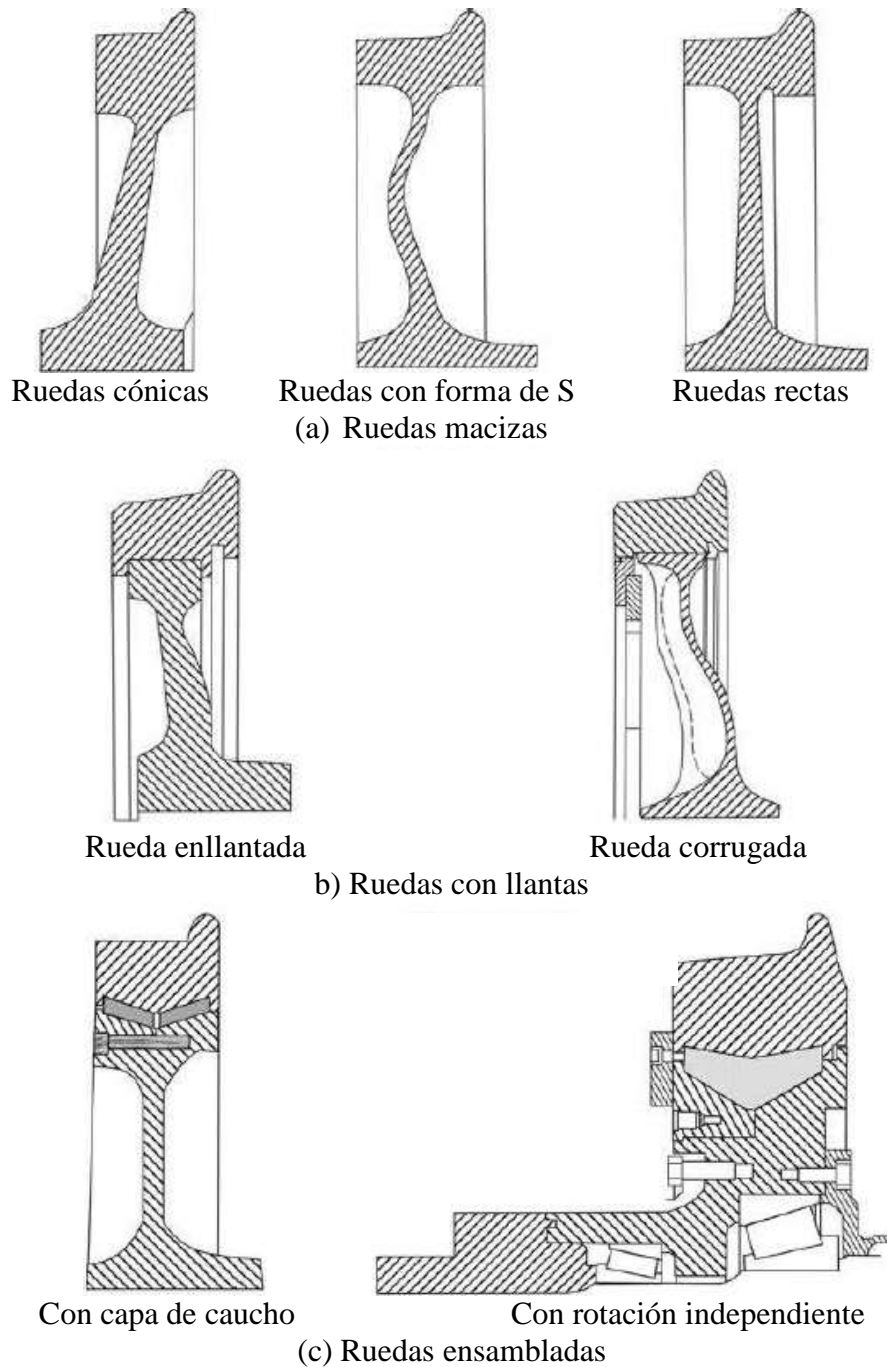


Figura 9: Principales tipos de ruedas ferroviarias [3].

E. Ejes

Un eje es un elemento de máquina que sirve de soporte para otros órganos o elementos, los cuales pueden girar u oscilar alrededor de éste. Dichos órganos pueden ser de muy diversos tipos, como ruedas dentadas, tambores, poleas de un sistema de transmisión, rodetes, etc. Un eje pueden encontrarse en reposo mientras giran los elementos de máquinas que sustenta (eje inmóvil) o por el contrario, puede girar solidariamente con dichos elementos (eje giratorio) [].

F. Diferencia entre un eje y un árbol

Los ejes están diseñados para soportar tanto esfuerzos de flexión como momentos torsionales. Debemos realizar la aclaración de cuál es la diferencia principal entre "eje" y "árbol":

- Los ejes son elementos destinados a que una o más ruedas puedan girar libremente. Estos elementos no transmiten potencia y por ello están sometidos solamente a esfuerzos de flexión, con efecto de fatiga los ejes de vagones.

- Los árboles son los elementos giratorios encargados de transmitir potencia, estando por ello sometidos, a veces, a esfuerzos de torsión pura y casi siempre a esfuerzos combinados de torsión y flexión. El esfuerzo de torsión se produce al transmitir potencia y la flexión debido a las fuerzas radiales que aparecen según sea la forma como se transmite la potencia a otro árbol (mediante acoplamientos, cadenas de transmisión, correas planas y trapeciales, por medio de engranajes, etc.). Como en el caso de ejes, quedan expuestos a esfuerzos de fatiga, especialmente en flexión.

G. Suspensión

La suspensión es el conjunto de elementos elásticos, amortiguadores y otros elementos asociados a ellos que conectan el juego de ruedas a la carrocería del vehículo. Si el bogie tiene una estructura rígida, la suspensión por lo general consta de dos partes: la suspensión primaria que conecta los juegos de ruedas al bastidor del bogie y la suspensión secundaria entre el bastidor del bogie y la parte baja de la carrocería del vehículo. A este tipo de bogies se les denomina doblemente suspendidos. Algunas veces, sobre todo en bogies de vagones de mercancías, se utiliza solamente una suspensión simple. Cuando ésta ocupa la posición de la suspensión primaria se suele denominar "suspensión de caja de eje" y cuando ocupa la posición de la suspensión secundaria se le denomina "suspensión central".

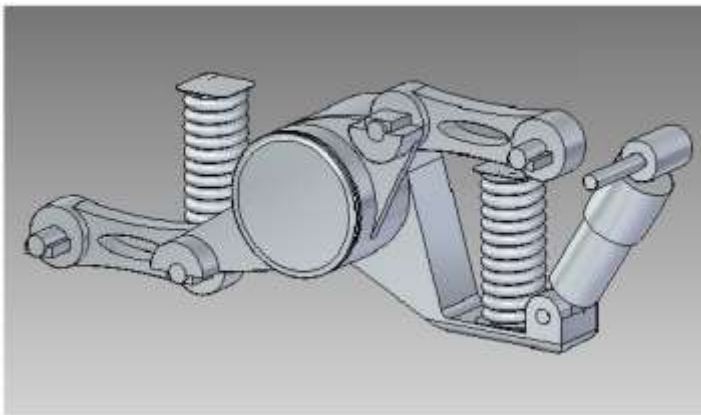


Figura 10: Sistemas de suspension. Izquierda: bieletas. Derecha: Secundaria de resortes.

2. Procesos de fabricación

2.1. Fabricación de ruedas

La demanda actual de los mercados de ruedas ferroviarias, busca conseguir unas tolerancias lo más ajustadas como sea posible, así como alargar la vida en servicio de tales ruedas. Para satisfacer esta demanda y ser a la vez capaces de producir en una base lo más económica, se requiere por una parte maquinaria moderna y por otro lado una tecnología sofisticada en la producción de ruedas.

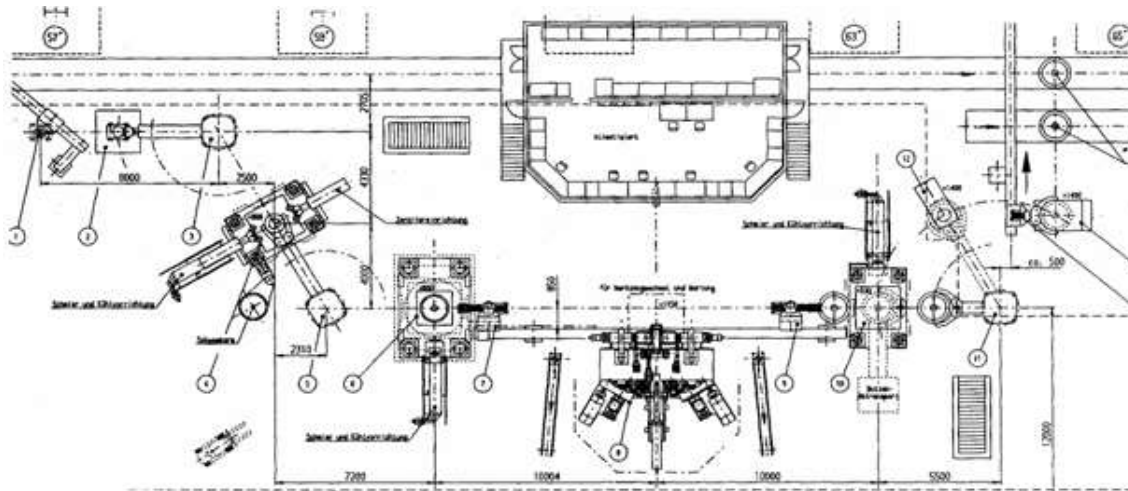
Debido al incremento de la velocidad de los trenes en los últimos años, se debe tener en cuenta el consumo de energía, reduciéndolo todo lo posible, y el incremento en el confort de viaje. Para conseguir estos dos aspectos hay que controlar el peso de las masas rodantes, reduciendo el peso de las ruedas de ferrocarril todo lo posible y mejorando al mismo tiempo su resistencia para soportar las mayores tensiones que existen, como resultado del incremento de las cargas radiales y laterales en las ruedas, así como el aumento de las cargas térmicas.

Los requerimientos necesarios en el caso de las ruedas ferroviarias son:

- uso de materiales modernos y de altas calidades, como aceros desgasificados al vacío,
- estructuras especiales en las ruedas,
- medidas especiales, para la reducción de tensiones residuales y para el incremento en la tenacidad de fractura manteniendo a la vez buenas propiedades a fatiga.

Las ruedas de acero se pueden fabricar por forja, o por colado. En Europa es más frecuente el uso de ruedas forjadas, mientras que en Estados Unidos es más frecuente el uso de ruedas coladas. Para el ámbito local las especificaciones las encontramos en [5, 6]. La llanta de las ruedas además se suele someter a un tratamiento de templado y revenido, dejando el velo y el cubo en estado normalizado. Ensayos comparativos existentes entre ruedas fundidas y forjadas, muestran claramente la superioridad de las ruedas forjadas considerando la tenacidad de fractura. Las ruedas forjadas ofrecen máxima seguridad haciéndolas apropiadas para el uso en trenes de pasajeros de alta velocidad. El tratamiento térmico de la llanta de la rueda, influye en evitar el desarrollo y progreso de fisuras térmicas, influyendo por otra parte la forma de la rueda en la distribución de tensiones y en su estabilidad dentro del ancho de vía.

En los métodos de producción de ruedas de ferrocarril, no solo hay que tener en cuenta los requerimientos técnicos, sino también hay que conseguir técnicas de producción económicas, mejorando la utilización del material. La configuración de una línea de producción de ruedas ferroviarias se muestra en la Figura 11.



- | | | |
|-------------------------|-------------------------|-----------------------|
| 1. Manipulador de carga | 6. Prensa de 90 MN | 11. Manipulador carga |
| 2. Limpieza | 7. Manipulador de carga | 12. Prensa de marcado |
| 3. Manipulador de carga | 8. Máquina conformado | 13. Máquina medida |
| 4. Prensa de 50 MN | 9. Manipulador de carga | 14. Manip. descarga |
| 5. Manipulador de carga | 10. Prensa de 50 MN | |

Figura 11: Disposición general de la línea con componentes (NTMK, Rusia).

2.1.1. Tratamiento térmico

El tratamiento de temple al que se somete la llanta consiste en calentar la rueda en un horno hasta los 827°C para eliminar las tensiones generadas en el forjado. Posteriormente la llanta se enfría con agua pulverizada durante 345 s. Como la primera temperatura está por encima de la temperatura de transformación de fase, se produce la transformación de austenita a perlita durante el enfriamiento. La microestructura perlítica es la que da a la llanta su alta dureza. En este punto la llanta se ha enfriado y se expande, mientras que el velo y el cubo siguen calientes y relativamente más blandos. La rueda se deja enfriar al aire durante aproximadamente 4 minutos para dejarla posteriormente en un horno a una temperatura de 480 °C durante dos horas, para aliviar algunas de las tensiones generadas durante el enfriamiento de la llanta. Durante este período el velo y el cubo se enfrían por debajo del punto de transformación y se contraen tirando de la llanta, que está más rígida. Este fenómeno induce tensiones residuales de compresión en la llanta. Finalmente la rueda se deja enfriar a temperatura ambiente durante aproximadamente 6 horas.

El resultado es que la parte inferior de la llanta y el velo quedan sometidos a tracción mientras que el resto de la llanta queda a compresión. Este estado de tensiones residuales a compresión impide la formación y crecimiento de fisuras, reduciendo el riesgo de fallo en servicio. El campo de tensiones residuales a compresión se crea hasta una profundidad de alrededor de 40 mm desde la banda de rodadura. A medida que la rueda se desgasta y es reperfilada, la capa de tensiones a compresión desaparece y la superficie de rodadura se acerca a la capa de tensiones a tracción. La sensibilidad al agrietamiento térmico aumenta con el aumento del contenido de carbono. La disminución producida en la dureza y la resistencia al desgaste que se produciría al disminuir el porcentaje de carbono deberá ser compensada añadiendo aleantes. Por ello cuando se quieren mejorar las características de resistencia de las ruedas es preferible modificar el tratamiento térmico para lograr un tamaño de grano más fino que aumentar el contenido de carbono en el acero.

En la zona de la llanta hay menores proporciones de ferrita y valores de dureza mayores. Hacia el velo y hacia la pestaña, el incremento en la cantidad de ferrita es responsable de la disminución en los valores de la dureza. A una profundidad de entre 0 y 0.03 mm de la superficie, la estructura es una mezcla ferrítica carburo que contiene muchas microfisuras orientadas a ángulos entre 0 y 30°, la longitud de estas microfisuras está entre 0.015 y 0.25 mm y su profundidad entre 0.007 y 0.035 mm. El ancho de las fisuras varía entre 0.0002 y 0.0030 mm y la distancia entre las mismas está entre 0.01 y 0.5 mm. La siguiente zona es la de transición al materia base, el tamaño de esta zona es de aproximadamente unos 3 mm. Las fisuras de fatiga se propagan principalmente a través de la ferrita.

Para asegurar que no se producen defectos macroscópicos en las ruedas tras su fabricación, a petición de las empresas de fabricación de trenes y mantenimiento de los mismos, todas las ruedas son inspeccionadas por el proveedor mediante la técnica de ultrasonidos, siendo el tamaño mínimo de defecto permitido de 1, 2 ó 3 mm (reflexión igual a la de un agujero de fondo plano de diámetro 1, 2 ó 3 mm).

2.2. Proceso de fabricación de ejes, [1]

Los ejes rectos de hasta 150 mm de diámetro se obtienen generalmente de perfiles redondos torneados, descortezados o estirados en frío, y los de diámetros superiores se obtienen de piezas forjadas por mecanización mediante el arranque de viruta. Los gorriones (también llamados muñones, son las partes del eje que giran en contacto con el correspondiente apoyo) y escalones se terminan, según las exigencias, con un torneado de precisión, rectificado, pulido a presión, prensado o lapeado. Cuando han de estar sometidos a esfuerzos elevados reciben un temple superficial (el núcleo debe permanecer blando) y un proceso de rectificación muy precisa para mejorar las prestaciones.

Las principales operaciones de mecanización que se llevan a cabo en la creación de un eje son:

- Enderezado de la pieza en bruto antes del desbaste en torno. El enderezado debe repetirse, si es necesario, después de otras fases de mecanización).
- Tratamiento térmico (endurecimiento superficial, revenido, bonificado, etc.)
- Fase de control.
- Acabado (rectificado, equilibrado y afinado).

Tras estas fases de mecanización, la pieza tendría que pasar el respectivo control de verificación. Tal cantidad de operaciones tiene como fin principal asegurar un perfecto estado del eje en el momento de instalación en el equipo. Por normativa, los ejes muy revolucionados (a partir de 1500 r.p.m.) deben ser rígidos, tener apoyos fijos (usando topes laterales en los cojinetes, anillos de retención, etc.) y estar equilibrados.

2.2.1. Geometrías

Generalmente los ejes adoptan una sección tal para que las tensiones sean aproximadamente uniformes a lo largo de su longitud. Por ello, en diferentes tramos existen diámetros diferentes, siendo extraña la forma cilíndrica en toda su longitud. Los esfuerzos de flexión alternativos presentes en los ejes giratorios, traen consigo el peligro

de rotura por fatiga (efectos de entalladura) en todas las transiciones de sección, rebajes, ranuras, etc. Las puntas de tensión pueden eliminarse adoptando diversas precauciones durante el diseño, como puede ser suavizando los cambios de sección. Existen dos tipos de ejes: macizos y huecos. La diferencia entre ambos es que el eje hueco cuenta con un orificio longitudinal de extremo a extremo de la pieza. Mediante esta reducción de material podemos conseguir que la pieza pese un 20% menos que la original pero conservando un asombroso 90% del momento resistente de la pieza entera. (Valores procedentes de un estudio con eje hueco de diámetro de agujero $\frac{1}{2} d_{\text{original}}$).

El flujo de fuerzas que circula longitudinalmente por un eje es de una importancia decisiva para su resistencia. Según las formas y las terminaciones realizadas podremos desviar más suavemente el flujo de fuerzas y aumentar la resistencia a la fatiga. También puede desviarse más suavemente el flujo dotando a las piezas de ranuras de descarga. De esta manera, los ejes sometidos a esfuerzos de flexión alternativos pueden ser optimizados en gran medida para mejorar su resistencia a fatiga. Según sea la aplicación deseada, se han diseñado ejes especiales para conseguir la transmisión de fuerzas entre grupos móviles de accionamiento y de trabajo. La particularidad de estos ejes es la flexibilidad, ya que están formados por almas de varias capas que se conducen por el interior de un tubo metálico flexible que los recubre y protege. De esta manera conseguimos un eje de alta polivalencia estructural y laboral.

2.2.2. Materiales

El material más utilizado para este tipo de piezas es el acero estructural:

Composición: Es un acero producto de la aleación de hierro, carbono y pequeñas cantidades de otros elementos tales como silicio, fósforo, azufre y oxígeno, que le aportan características específicas. El acero laminado en caliente, fabricado con fines estructurales, se denomina como acero estructural al carbono, con límite de fluencia de 250MPa.

Propiedades: Alta resistencia, calidad homogénea, fiabilidad, soldabilidad, ductilidad, incombustibilidad. A altas temperaturas sus propiedades mecánicas fundamentales se ven gravemente afectadas. Además posee una buena resistencia a la corrosión en condiciones normales. El acero es más o menos un material elástico, responde teóricamente igual a la compresión y a la tensión, no obstante, con bastante fuerza aplicada, puede comenzar a comportarse como un material plástico. Sin embargo en ocasiones la fase plástica es útil y da un plazo de tiempo para ser sustituida y evitar así el colapso total de la pieza. Para aplicaciones de cierta responsabilidad, se opta por mejorar el acero estructural simple mediante una serie de procesos de refinado. De esta forma, los ejes se construyen de aceros DIN St42 o DIN St50, y los que están sometidos a elevados esfuerzos, de DIN St60. El empleo de aceros aleados, cuando existen esfuerzos oscilantes (flexión alternativa), solamente es ventajoso si no existen efectos de entalladura, ya que los aceros de alta resistencia son sumamente sensibles a este tipo de esfuerzos. A su vez, los ejes contruidos de aceros aleados de alta resistencia, no son más rígidos que los fabricados de aceros de construcción en general, ya que ambos tipos de material tienen igual módulo de elasticidad.

3. Defectos en ruedas

3.1 Introducción, [7]

La acumulación de daño por fatiga, deformación plástica y desgaste, reduce de manera significativa la vida en servicio del material ferroviario. En la actualidad, los aumentos tanto de velocidad como de carga por eje en los vehículos ferroviarios, conducen a tensiones elevadas en el contacto rueda-riel. Esta evolución conduce a cambiar el principal daño existente en la llanta de la rueda, de desgaste a fatiga. A diferencia de los lentos procesos de deterioro por desgaste, la fatiga causa fracturas abruptas en las ruedas o pérdidas de material en la superficie de la banda de rodadura. Estos fallos pueden causar daños en rieles, en suspensiones de trenes y, aunque no ocurre con frecuencia, pueden conducir al propio descarrilamiento del tren. El problema de fatiga de ruedas ferroviarias se refiere a menudo, al fenómeno de RCF, por sus siglas en inglés - Rolling Contact Fatigue (fatiga por contacto de rodadura)-, causado por esfuerzos repetidos en el contacto rueda-riel durante el movimiento de rodadura.

Aunque la fatiga es el principal fenómeno de daño en ruedas ferroviarias, existen otros tipos de daño como desgaste, esfuerzos térmicos y deformaciones que afectan a la integridad de la rueda, en ocasiones provocando imperfecciones más destructivas que la propia fatiga. Por tanto la existencia de un riguroso plan de mantenimiento en ruedas ferroviarias es de gran importancia para la seguridad de los trenes y el control de las fisuras existentes debido a la fatiga, representando el mantenimiento de las ruedas entre un 30% y un 50% de los costos totales de mantenimiento. La mayoría de estos costos están asociados a los reperfilados de las ruedas. Para reducir este elevado costo de mantenimiento es necesario disminuir el nivel de las cargas dinámicas en las ruedas, evitando de esta manera el deterioro y fractura de los componentes del vehículo y de la vía, reduciéndose así los niveles de vibración y ruido. Recordemos que son los defectos en las ruedas como las imperfecciones de las vías los causantes de los elevados niveles de cargas dinámicas.

Previo al estudio de los tipos de daño que existen en las ruedas ferroviarias o que pueden aparecer en ellas y el motivo de su aparición, es importante conocer los tipos de esfuerzos presentes cuando la rueda gira sobre el riel.

3.2. Esfuerzos existentes en ruedas

Los grandes esfuerzos a los que están sometidas las ruedas se deben a las cargas por rueda y a las fuerzas de guiado. La banda de rodadura es la parte de la rueda que más esfuerzos soporta, apareciendo en la banda de rodadura de las ruedas motrices y de las ruedas sobre las que se aplican los frenos, deslizamientos y altas cargas térmicas.

Los esfuerzos a los que está sometida la rueda pueden clasificarse desde el punto de vista del tiempo transcurrido en el que se manifiestan o también desde el origen de dichos esfuerzos. Desde el punto de vista del espacio de tiempo en el que se manifiestan, los esfuerzos se clasifican en:

- Esfuerzos constantes o de variación lenta en el tiempo. En este grupo se incluyen las tensiones residuales de fabricación, las tensiones de calado de ruedas y eje, y las tensiones permanentes desarrolladas tras una frenada de larga duración.

- Esfuerzos que se manifiestan de forma intermitente. En este grupo se incluyen las tensiones debidas a gradientes térmicos.
- Esfuerzos cíclicos. Se manifiestan en la zona elasto-plástica de contacto entre rueda y riel y son las tensiones ligadas a la rodadura. Se deben a la carga, al esfuerzo de tracción y pseudo deslizamiento. Aunque las cargas no sean muy elevadas, se pueden producir en la zona de contacto rueda-riel deformaciones plásticas en la llanta. Durante los primeros ciclos de carga se introducen en la rueda tensiones residuales, que junto a las deformaciones existentes, producen un endurecimiento del material.

La otra clasificación de los esfuerzos desde el punto de vista de su origen es:

- Esfuerzos térmicos. Las frenadas y los esfuerzos motores o retardadores cuando se produce patinaje debido a la pérdida de adherencia entre la rueda y el riel, provocan la aparición de dichos esfuerzos, que afectan sobre todo a la zona de la banda de rodadura, pudiendo llegar a producir transformaciones metalúrgicas en el acero (templado de las zonas que han patinado). Fuertes frenadas pueden crear tensiones que exceden en ciertas zonas el límite elástico del material, provocando modificaciones en el campo de tensiones residuales, favoreciendo de esta manera la evolución de fisuras en zonas profundas.
- Esfuerzos mecánicos. La existencia de un esfuerzo vertical aplicado sobre la banda de rodadura en el contacto rodante y un esfuerzo lateral sobre la pestaña debidos a la carga por rueda y al guiado sobre la vía, provocan la aparición de esfuerzos mecánicos.

Los esfuerzos dependen del diseño del bogie, del diámetro y tipo de rueda, carga por eje, valor de la masa no suspendida, suspensión y de los sistemas de guiado y frenado. También dependen de las condiciones de utilización, como puede ser la velocidad, carga y tipo de trenes, y de las condiciones de acoplamiento entre la rueda y el riel, como pueden ser sus perfiles. Además los esfuerzos también dependen de defectos existentes en las ruedas, como defectos de fabricación, ovalidad, diferencia de diámetros entre ruedas de un mismo eje, entre otros.

3.3. Categorías de daño

Los esfuerzos citados anteriormente provocan daños en el material de la rueda, que en algunas ocasiones pueden ser muy peligrosos para la seguridad ferroviaria. Los principales tipos de daño en ruedas se agrupan, en términos generales, en desgaste, fatiga, deformación, térmico y de infraestructura.

Desgaste. El daño desarrollado está asociado con un mecanismo de desgaste que causa cambios en el perfil de la rueda. Dichos cambios se producen principalmente en la banda de rodadura aunque sin descartar el desgaste en la pestaña de la rueda.

Fatiga. En los últimos años es evidente un incremento en la cantidad de ruedas retiradas de servicio por causas de daño por fatiga; en comparación con otras causales (ruedas falladas, desgaste, malos procesos de reparación). Esto es explicable, por una parte, debido a la mejora de los procesos de fabricación de ruedas, que tiende a reducir las incidencias por estas últimas causas. Por otra parte, el incremento de las sollicitaciones mecánicas (velocidades, aceleraciones y cargas por eje) hace que aumenten las ruedas

retiradas por efectos de la fatiga mecánica en el material. El desarrollo de la red de fisuras por fatiga puede provocar pérdidas de material causando la formación de cavidades, conociéndose este tipo de fisuras como “shelling” (fisuras sub-superficiales con pérdida de material).

Deformación. Altas presiones de contacto, fuerzas de arrastre y/o materiales no homogéneos pueden conducir a esta tercera categoría de daño en la banda de rodadura asociado con deformación del material, dicha deformación se puede encontrar distribuida en toda la banda de rodadura o localizada en diversos puntos.

Térmico. Cargas térmicas procedentes de frenadas, sea desde el deslizamiento de los ejes montados o el calor generado durante bloqueo de las ruedas causan unos tipos de daños muy variados. El proceso de pérdida de material de la banda de rodadura es el resultado del desarrollo de una red de fisuras, seguida de la creación de martensita en la zona afectada por el calor, conociéndose esta red de fisuras superficiales como “spalling”.

Infraestructura. El ferrocarril es un sistema con una interacción clave entre rueda y riel. Por tanto hay un rango de daños que son dependientes de la infraestructura, junto con el sistema crítico de la interacción rueda y riel.

3.3.1. Desgaste en la banda de rodadura (HW)

“Hollow wear” (HW) es el término dado para el desgaste existente en el centro de la banda de rodadura. Este efecto de desgaste concentrado, a menudo se produce debido al uso de bogies de marcha muy estables que circulan preferentemente por rutas muy rectas. La interacción de las zapatas de frenado con la banda de rodadura puede, dependiendo de su configuración y la selección del material, también acelerar el desarrollo de este tipo de desgaste.

Si este tipo de desgaste es muy significativo en el centro de la banda de rodadura, puede causar el desarrollo de la llamada “falsa pestaña”, como se muestra en la Figura 12. Además de afectar la dinámica del vehículo también puede ocasionar daños importantes tanto en la cabeza del riel como en los cambios y cruces de vía.

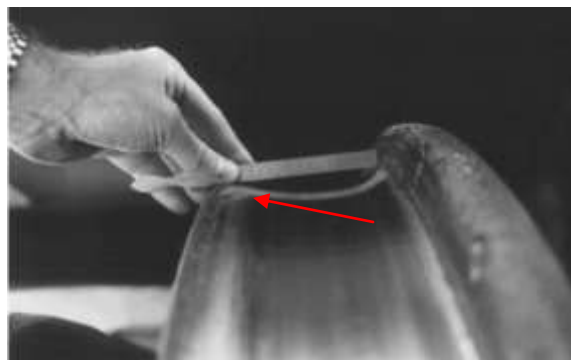


Figura 12: “Hollow Wear”. El desarrollo de una falsa pestaña en la parte contraria a la pestaña perteneciente a la rueda está claramente ilustrado en la imagen, [8].

Debido a que las medidas de la rueda se toman en el plano del círculo en la banda de rodadura, para las medidas de altura de la pestaña y anchura de la misma, el desgaste HW puede causar un incremento de dichas medidas; aunque realmente no son medidas

reales, si no debidas a dicho desgaste, como sería el caso de la zona sombreada en rojo, si se considera el parámetro F_n –altura de la pestaña- en la Figura 13. El desarrollo de este tipo de desgaste afecta a la conicidad efectiva del eje montado. Si el desgaste aumenta puede, en ciertos casos, afectar a la dinámica y a los límites de estabilidad del vehículo.

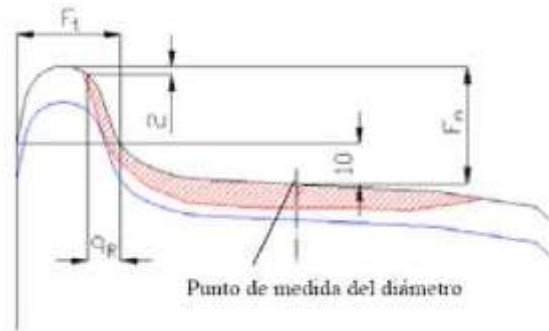


Figura 13: Puntos de medida del ancho de pestaña (F_t), altura de pestaña (F_n), que es la distancia horizontal desde el punto de medida del ancho de pestaña hasta 2mm por debajo del punto más alto de la pestaña, [2].

El desgaste durante los primeros kilómetros de vida de la rueda es uniforme en toda la banda de rodadura, siendo después mayor en dos zonas, cerca de la pestaña y en el extremo opuesto a la misma. Este desgaste se debe principalmente a las fuerzas de arrastre que actúan en la banda de rodadura cuando la rueda opuesta está con la pestaña haciendo contacto en el riel.

Las características de rueda y riel en la zona de contacto son casi imagen la una de la otra, así las tensiones máximas a cortante en la rueda y en el riel serán similares. El desgaste de rueda y riel depende de la dureza de sus materiales y es, en general, bastante lento. El aumento de la velocidad de los trenes ha producido un aumento del desgaste y de las tensiones presentes en las ruedas.

El uso de aceros de mayor resistencia y la optimización de la lubricación llevada a cabo en los últimos años ha traído como consecuencia que el desgaste disminuya, pero a costa del aumento de la fatiga por contacto de rodadura.

El siempre inquietante planteamiento de aumentar la capacidad de carga de los trenes, en especial los de mercancías, puede producir serios problemas, como un rápido desgaste de los rieles, daño en las juntas aislantes, riesgo de fallo de los rieles por fatiga y fractura, etc.

3.3.2. Desgaste de la pestaña (FW)

El desgaste de la pestaña, FW -flange wear-, afecta tanto a la cara de la pestaña como a la parte posterior de la misma. Se trata de fisuras de progresión axial que pueden afectar a una o varias zonas de la pestaña.

Este tipo de fisuras pueden tener origen térmico o mecánico. En el caso de origen térmico la aparición de dichas fisuras se debe a una fricción severa de la zapata de freno sobre la pestaña, por el uso de zapatas de geometría inadecuada. En el caso de fisuras de origen mecánico, las fisuras se producen por presiones anormales entre pestaña y riel debidas a trazados de vía deficientes. Estas fisuras pueden verse principalmente en los trenes de mercancías.

El desgaste de la cara de la pestaña está típicamente influenciado por la curvatura de la ruta seguida, la infraestructura, características del bogie y el régimen de lubricación. También se sabe que los desgastes elevados de la cara de la pestaña son causados por unas secciones con juegos muy limitados, es decir, muy ajustados, ver Figura 14. En casos donde se produce un desgaste intenso de la cara, se puede observar un desgaste menor en la vía por la que circulan dichas ruedas.

Si hay una diferencia notable en el desgaste de la pestaña entre los lados diferentes de un vehículo, esto normalmente indica la existencia de un perfil o régimen de lubricación asimétrico. Un desgaste asimétrico diagonalmente del bogie puede indicar también ser resultado de una puesta en marcha incorrecta del vehículo.

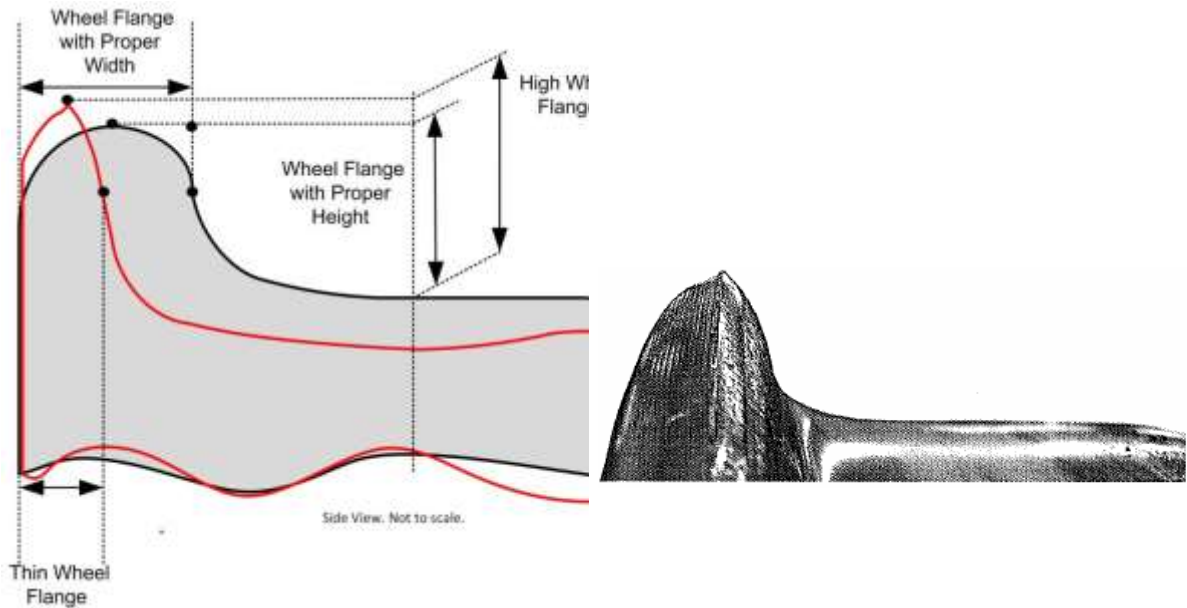


Figura 14: Desgaste moderado en la cara de la pestaña [9].

El desgaste de la parte posterior de la pestaña es causado por contacto con obstáculos en la vía, desvíos y cruces. Irregularidades en la base y punta de la pestaña tales como una pestaña puntiaguada o un radio anormal en la base de la pestaña, pueden entrar dentro de esta clasificación de daño. Tales irregularidades no deben exceder los límites aplicables que figuran en el manual de mantenimiento del vehículo, para asegurar una interacción segura en cruces y desvíos.

El desgaste en la pestaña es más severo durante los primeros 500 km, mientras que después se reduce. Este mayor desgaste inicial se debe al hecho de que el perfil nuevo entra en contacto con el riel en una pequeña zona, soportando elevados valores de presión y, por lo tanto, con una alta fricción, ver Figura 15.



Figura 15: Imagen de rueda que ha sufrido un desgaste severo [10].

3.3.3. Pérdida de circularidad de la rueda

Principalmente existen dos formas de pérdida de circularidad de la rueda, periódica o aleatoria.

Para la pérdida de circularidad periódica (POOR, periodic out of round), la no circularidad de la rueda es regular y su forma se puede determinar. Por ejemplo una rueda con POOR de tercer orden tiene una forma triangular y con cuarto orden tiene forma cuadrangular. Tales formas periódicas de pérdida de circularidad pueden ser causadas como resultado de un sistema de interacción o del proceso de mecanizado de la rueda. En ruedas resistentes aparecen números de orden elevados. En la Figura 16 se observan varios ordenes de poligonización.

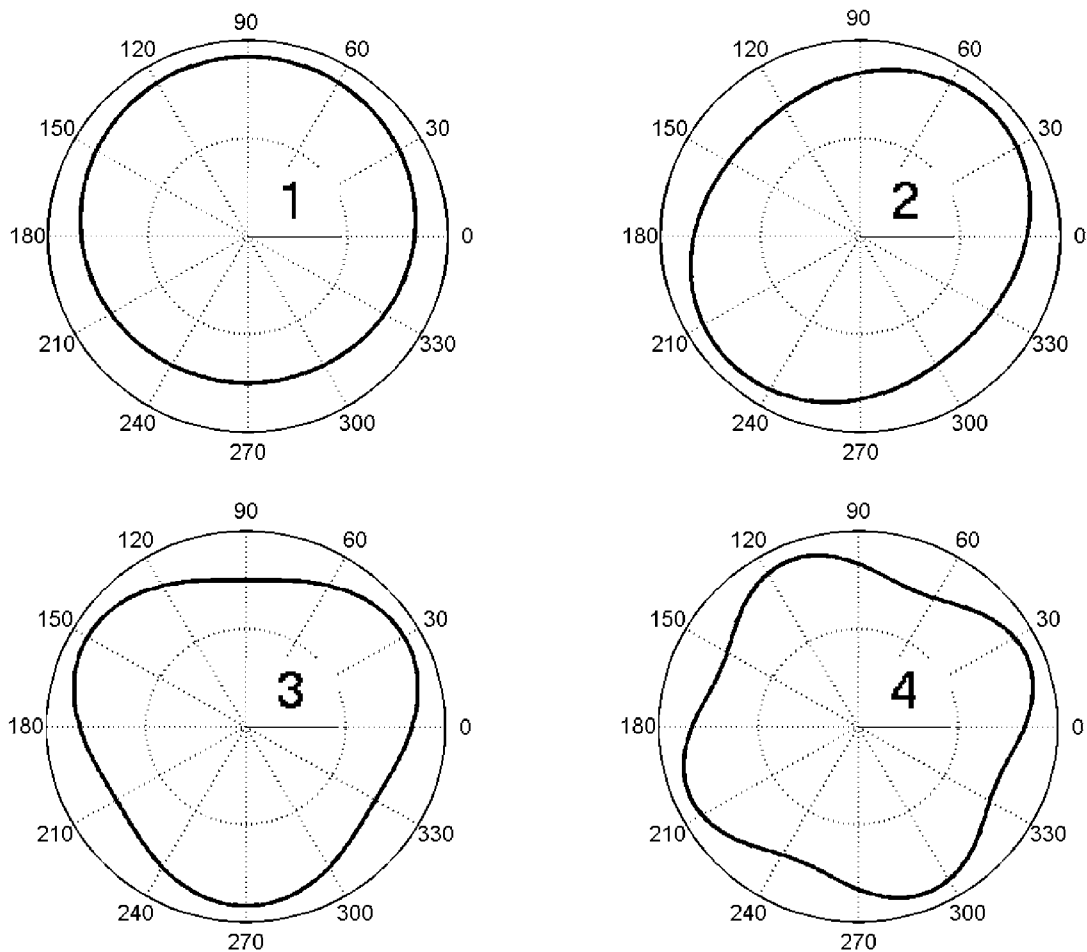


Figura 16: 1^{er} orden POOR - Excéntrica. 2^{do} orden POOR – Óvalo. 3^{er} orden POOR – Triángulo. 4^{to} orden POOR – Rectángulo, [11].

Cuando el modelo de pérdida de circularidad no se puede determinar y por tanto es aleatorio, entonces a este caso se lo conoce como SOOR, ver Figura 17. Este fenómeno a menudo se debe a la presencia de una microestructura muy variada dentro de la banda de rodadura, como resultado de la aplicación de los tratamientos térmicos durante la fabricación de la rueda. La superficie de la banda de rodadura idealmente debería ser perlítica y no debería contener ninguna mezcla adicional de bainita y martensita. La magnitud de las irregularidades radiales desarrolladas debido a la presencia de una microestructura variada puede encontrarse en el rango de 0.5 - 1.0 mm.

Después del primer o posiblemente segundo reperfilado tales áreas que contienen una microestructura variada deberían haber sido eliminadas y en relación con esto no se debería desarrollar ninguna pérdida de circularidad aleatoria, que es el caso que nos ocupa.



Figura 17: Rueda con pérdida de circularidad aleatoria, SOOR, [12].

Si no hay disponible ninguna técnica automática para llevar a cabo las medidas de pérdida de circularidad, entonces se puede medir de manera manual haciendo uso de un reloj comparador. Cuando se use tal aproximación manual las irregularidades radiales deberían ser medidas en al menos 24 puntos igualmente espaciados a lo largo de toda la circunferencia de la rueda sobre el plano de la banda de rodadura así como a lo largo de dos planos situados a 10 mm a cada lado del plano de la banda de rodadura. Para ruedas de locomotora de grandes diámetros la resolución debe ser más fina, por tanto las medidas se tomarán en 36 o 48 puntos o cuando los resultados obtenidos sean los apropiados.

3.3.4. Fatiga por contacto de rodadura (Rolling Contact Fatigue, RCF)

RCF, es el término con el que se le conoce al daño relativo de fatiga, inducido por la acción repetida de una fuerza de arrastre resultante, además de las fuerzas verticales de contacto rueda-riel actuando sobre la misma área de la rueda [13, 14]. Los ciclos repetidos de carga y descarga sobre la banda de rodadura de la rueda junto con las fuerzas de deslizamiento adicionales, conducen a través del proceso conocido como “ratcheting”, a una deformación plástica del material.

Una vez que se supera la ductilidad del material por el incremento de deformación plástica, las fisuras empezarán a iniciarse y a propagarse por estar sometidas a ciclos de carga repetidos en el material, en dirección paralela al plano de deformación del material. Una vez que las fisuras han alcanzado cierto tamaño, también se propagarán debido a la presión hidrostática aplicada por algunos fluidos (agua, grasa) que entran en las fisuras desde la banda de rodadura o por la cabeza del riel y quedan atrapados por la rotación de la rueda a lo largo del riel, [15]

En ciertas ocasiones las redes de fisuras se pueden haber desarrollado lo suficiente para que ocurra el fenómeno de “shelling”. Término utilizado para el proceso de pérdida de material desde la banda de rodadura, siguiente al establecimiento de una red de fisuras por fatiga.

Como las fisuras se propagan además dentro de la banda de rodadura su alineación cambiará lentamente desde su ángulo tangencial inicial y empieza a adoptar una alineación más radial. Debido a la diferencia longitudinal y a las fuerzas laterales presentes dentro de varias zonas de la banda de rodadura de la rueda, se obtienen cuatro tipos de zonas de RCF, dependientes de la localización como se observa en la Figura 18 (a); en esta sección se analizarán los daños de RCF en las cuatro zonas de esta figura. No obstante, para este y otros tipos de daño como la fatiga térmica presentada más adelante en 3.4.1.5, otros autores suelen dividir el análisis en tres zonas en lugar de

cuatro, [15] y [19], Figura 18 (b). Otro aspecto general en el reporte del daño es indicar si este se produce en un solo lugar alrededor de la circunferencia de la rueda, en varios lugares o alrededor de toda la circunferencia (como los desgastes en la banda de rodadura o en la pestaña estudiados anteriormente), ver Figura 18 (c).

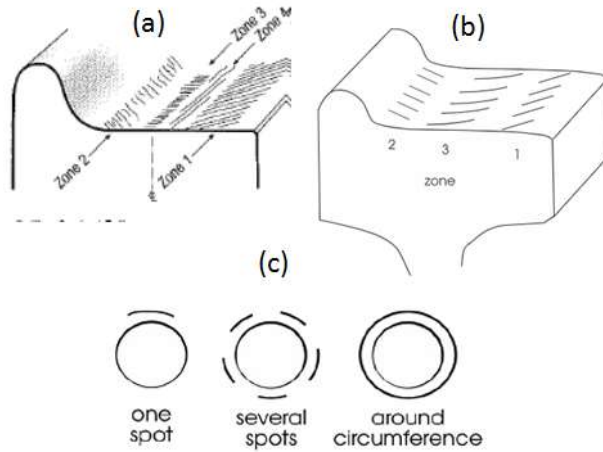


Figura 18: RCF. Localizaciones relativas a zonas de la rueda [19].

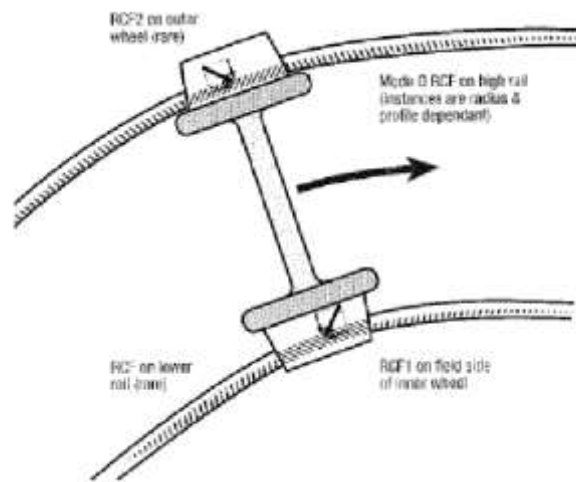


Figura 19: Desarrollo de RCF dentro de una curva [7].

Debido a la reacción igual y opuesta de las presiones de contacto y las fuerzas de deslizamiento involucradas, el daño por RCF afecta tanto a ruedas como a rieles. Sin embargo, debido a la diferencia de orientaciones y de magnitudes de fuerzas resultantes, los efectos varían. Por ejemplo, cuando aparece RCF clásica por el paso por una curva, ver Figura 19, las esquinas de la parte superior de los rieles y en general los perfiles, son afectados además de las ruedas por este tipo de daño. El proceso de creación de este tipo de daño, también llamado “Head Checks”, es referido a un Modo RCF0. Mientras para el eje montado será la rueda interior del eje, la que probablemente estará más afectada, por el modo RCF1 como se muestra a continuación. Típicamente los rieles son más sensibles a los efectos relativos a las fuerzas de tracción, mientras las ruedas son afectadas con más frecuencia por fuerzas relativas a frenadas, ver Figura 20.

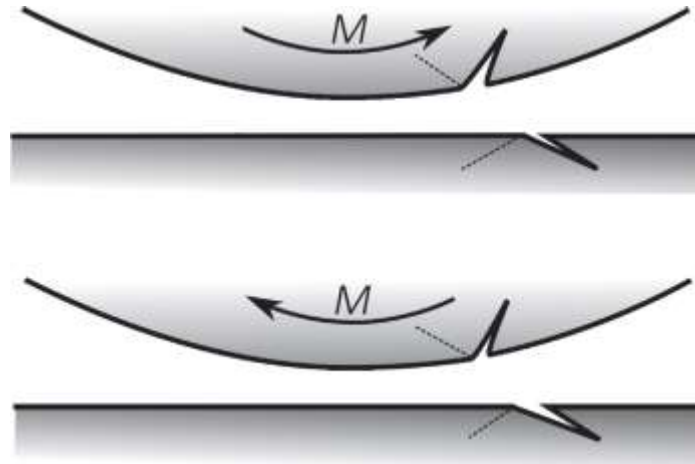


Figura 20: Esquemas de cómo un momento de frenado abre una grieta superficial en una rueda y cierra una grieta en el riel (arriba); mientras que un momento de tracción abriría la grieta del riel y cerraría la grieta de la rueda (abajo). Las líneas discontinuas indican caminos de propagación de grietas que se suprimen en gran medida debido a la carga de compresión, [15].

ZONA 1. RCF1

La acción repetida de las fuerzas de deslizamiento longitudinales y laterales inducidas por el paso por curva pueden dar origen a la variante clásica de RCF en la parte 1 de la banda de rodadura (zona 1); produciéndose principalmente en la parte exterior de la rueda que circula por la parte interna de la curva. Las diferentes relaciones entre las fuerzas de deslizamiento longitudinal y las fuerzas de deslizamiento lateral influenciarán en el ángulo de la red de fisuras, el cual típicamente estará entre 30° - 45° sobre el eje de la rueda, ver Figura 21.



Figura 21: a) Fisuras en zona 1 por RCF. Se destaca la orientación que forman estas fisuras con respecto al eje axial de la rueda, [13, 16].

ZONA 2. RCF2

Este daño es causado por los mismos mecanismos y fuerzas que intervienen en RCF de la zona 1 excepto que ocurre por la interacción de la rueda en su zona más cercana a la pestaña con el riel exterior de la curva, el cual está más elevado que el interior debido al peralte existente en la curva; Figura 22.

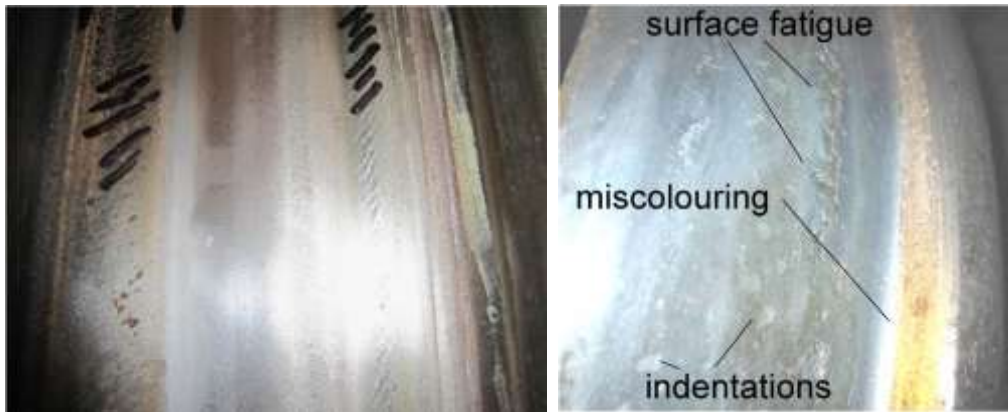


Figura 22: Fisuras por RCF en la zona 2 adyacente a la pestaña y en la zona 1. Una banda de fisuras RCF2 así como hendiduras y descoloramiento de la pestaña, [17, 18].

En la zona 2 el daño por RCF, típicamente, ocurre con mucha menos frecuencia que la zona 1 RCF. Debido a los cambios en la geometría y presión de contacto en la banda de rodadura mientras la rueda está en servicio, las fisuras por RCF en la zona 2 “desaparecen” debido al desgaste sufrido, a menos que se hayan establecido dichas fisuras permanentemente. Las fisuras de la zona 2 adoptan típicamente un ángulo alrededor de los 30° - 60° sobre el eje de la rueda, ver Figura 22.

ZONA 3. RCF3

El crecimiento de fisuras por fatiga en el centro de la banda de rodadura es un fenómeno poco frecuente que ocurre por la aplicación repetitiva de elevadas fuerzas longitudinales de tracción que dan origen a deslizamiento longitudinal. Por ejemplo, vehículos que sufren de manera regular casos de niveles elevados de deslizamiento (patinamiento) de ruedas o incluso rodadura pura cuando se aplica tracción para bajas velocidades, pueden empezar a exhibir tal daño por fatiga.

Debido a la componente longitudinal pura de las fuerzas de deslizamiento involucradas, las fisuras se orientan lateralmente a través de la banda de rodadura de la rueda y adoptaran un perfil con forma recta o en “C”. Hay que tener cuidado de no confundir esas fisuras por fatiga (con su orientación lateral de 0°-10° respecto del eje del vehículo) con las fisuras laterales por efecto térmico que son más críticas, asociadas con el sobrecalentamiento de la llanta en la banda de rodadura o por el bloqueo de frenos, ver Figura 23.

Una causa directa de las fuerzas de deslizamiento longitudinales que causan RCF en zona 3, son los diferentes diámetros de rueda dentro de un bogie, especialmente cuando los ejes son acoplados mecánicamente, y su instalación no es correcta dentro del bogie. Este hecho causa una fuerza de deslizamiento longitudinal permanente aplicada de manera constante tangente a la vía. En este caso la alineación de la fisura puede adoptar un ángulo de orientación más amplio.



Figura 23: a) Fisuras en las zonas 1 y 3. b) fisuras estables en toda la banda de rodadura,[19, 20],

ZONA 4. RCF4

Las fisuras pertenecientes a esta región tienen una orientación longitudinal significativa de unos 70° - 80° aproximadamente sobre el eje de la rueda, lo cual indica que están inducidas como consecuencia de una fuerza resultante lateral de deslizamiento. De manera similar como ocurre en la zona 2 RCF, por la rotación sufrida por el perfil de la rueda en servicio, a menudo se observarán algunas áreas locales de elevadas presiones de contacto locales o algunos efectos locales modificadores en el perfil (debido al desgaste o a la deformación plástica). Por tanto, estas fisuras de la zona 4 pueden “desaparecer” debido al desarrollo del perfil de la rueda, en servicio.

Si los niveles de desgaste existentes en el perfil son lo suficientemente altos para cambiar constantemente la superficie de la banda de rodadura, entonces el fenómeno de RCF no se establecerá. De esta forma, el fenómeno de desgaste en el contacto rueda/carril puede verse como un fenómeno positivo. El objetivo es encontrar una tasa de desgaste necesaria para conseguir una superficie de contacto lo suficientemente renovada y así evitar el establecimiento o propagación de una red de fisuras por RCF. En relación con esto que se menciona, hay que conseguir el balance óptimo entre desgaste y fatiga.



Figura 24: Ejemplos de defectos RCF en la zona 4. Se observa defectos de fatiga por contacto en otras zonas, [21].

3.3.5. RCF Clusters. CLUS

En este tipo de daño el fenómeno RCF tiene su efecto de daño localizado en la agrupación de fisuras existentes, pudiendo ocurrir en el centro de la banda de rodadura de la rueda. Estas agrupaciones a pesar de estar localizadas tienen un mecanismo de desarrollo similar al de RCF convencional.

Una vez originadas, tal agrupación de fisuras se propagan de manera significativa y conducen a un desprendimiento localizado en la banda de rodadura. Esto puede convertirse en un peligro incluso después de transcurrir un kilometraje limitado, desde dicho desprendimiento de material. La agrupación de fisuras RCF está también asociada con deformación plástica del material y fenómenos de “ratcheting” en común con RCF convencional. Al principio el crecimiento de fisura tiene un ángulo de inclinación sobre la banda de rodadura, tendiendo a una orientación más radial, profundizando sobre dicha superficie. En las Figuras 25 y 26 se muestran ejemplos.

Debido a la presencia de deformación plástica local por las crecientes fuerzas laterales de deslizamiento, se observa a veces que el desarrollo de una agrupación de fisuras por RCF pudo haber sido precedido por un desgaste localizado y severo en la banda de rodadura.



Figura 25: Cavidad formada por el desprendimiento de un RCF Cluster.

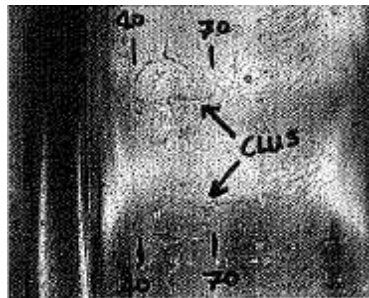


Figura 26: Rueda con dos RCF Clusters además de una banda de RCF1.

Debido a la propagación en profundidad de las agrupaciones de fisuras “RCF clusters”, el tamaño del área afectada puede aparecer más extenso durante los reperfilados, ver Figura 27.

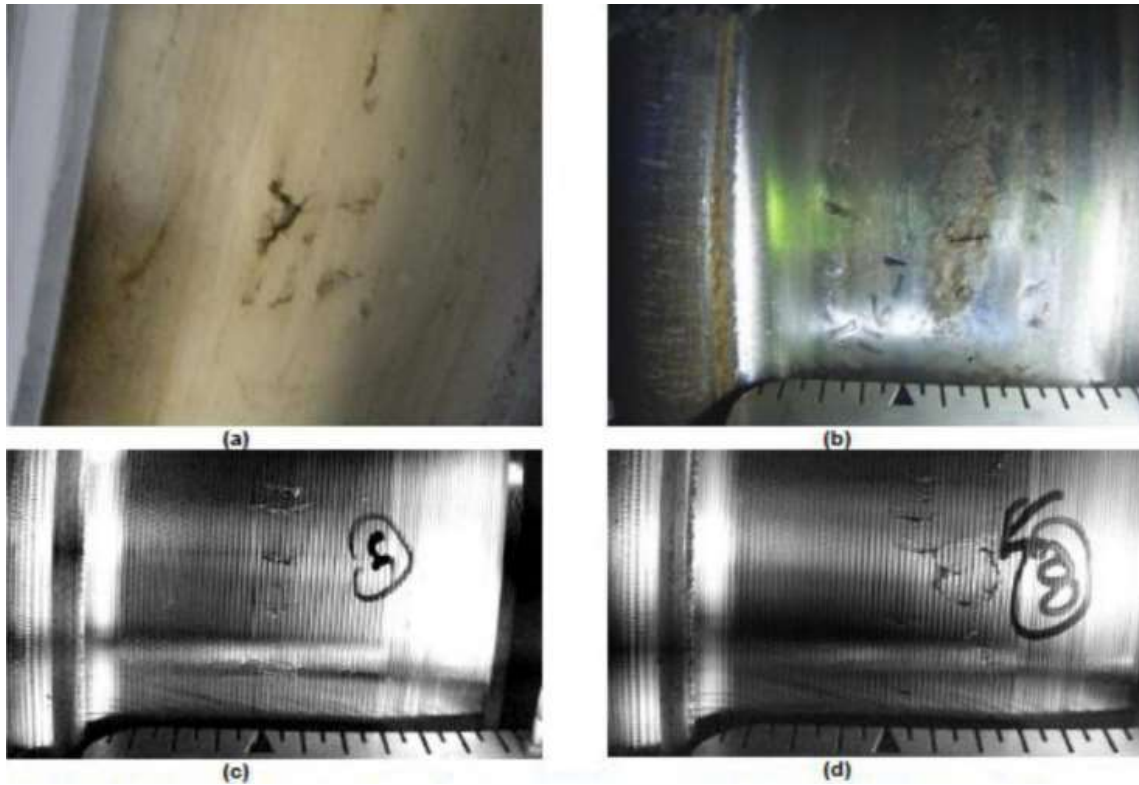


Figura 27: En a) y b) se muestra RCF Clusters antes de reperfilado. En c) y d) las fisuras aparecen más largas, más ensanchadas o más visibles durante el reperfilado, [21]

3.3.6. Fatiga sub-superficial. SUB

Esta forma de daño en rueda, aunque es raro que ocurra, puede conducir a la pérdida de una sección de la llanta.



Figura 28: Fisuras por fatiga sub-superficial que se han propagado sobre la cara de la llanta, [22].

Las fisuras por fatiga sub-superficial normalmente, pero no exclusivamente, se inician por la presencia de cuerpos extraños, escoria o pérdidas en la homogeneidad

metalúrgica del material dentro de la llanta. Según la rueda se aproxima a su límite de desgaste, las tensiones dentro de la rueda se incrementan; esto junto con el incremento de la acumulación de cargas cíclicas influyen en que alguna pérdida de homogeneidad dentro del material puede convertirse en un punto de inicio de fisura por fatiga. Si el vehículo está sometido a operar sobre secciones de vía corrugada o ha sufrido daños en la banda de rodadura, entonces las tensiones generadas pueden ser todavía mayores.

Con las mejoras globales en desarrollos de ruedas de acero sin impurezas, los procesos de inspección de ruedas por ultrasonidos y los regímenes de pulido de vías que controlan los rieles corrugados, los ejemplos de fisuras por fatiga sub-superficial son cada vez menores; pero la no utilización de aceros de alta calidad para ruedas ferroviarias provoca la existencia todavía de este tipo de daño debido a las inclusiones.

Las Figuras 28 y 29 muestran diferentes aspectos de este tipo de daño.

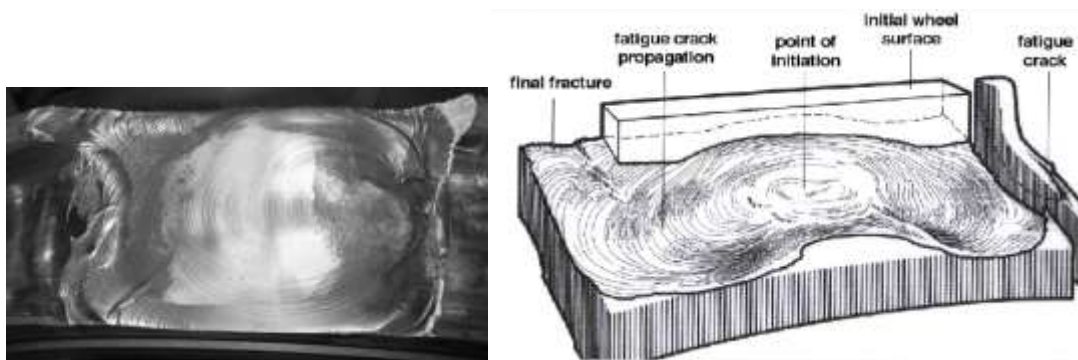


Figura 29: Pérdida de material en una zona de la banda de rodadura debido a una fisura sub-superficial, [19].

Hasta que dichas fisuras no lleguen a la zona superficial de la banda de rodadura, las fisuras sub-superficiales sólo pueden ser detectadas en servicio usando una metodología de ensayo no destructiva volumétrica, como por ejemplo, ensayos con ultrasonidos. Aunque una vez que la fisura sub-superficial se ha propagado lo suficiente hasta alcanzar la superficie de la cara de la llanta o posiblemente la cara posterior de la pestaña, este tipo de fisuras pueden detectarse visualmente.

La consecuencia de la pérdida de un segmento de la banda de rodadura de la rueda debido al desarrollo completo de una fisura sub-superficial es peligrosa, ya que en ocasiones la pérdida del segmento puede incluir una sección de la pestaña lo cual puede incrementar de manera significativa el peligro por descarrilamiento cuando existen en el recorrido curvas cerradas, desvíos o cruces.

3.3.7. Deformación lateral en la banda de rodadura. TRO (Tread Roll Over)

Este tipo de daño por deformación lateral, causa un labio desarrollado sobre la parte del chaflán en la banda de rodadura de la rueda, Figura 30.



Figura 30: Un ejemplo clásico de Tread Roll Over el cual ha creado un labio que sobresale de la cara de la llanta.

La cantidad permisible de deformación lateral se establece normalmente en el manual de mantenimiento del vehículo. Hay variaciones en redes y vehículos donde está permitida cierta cantidad de deformación.

Típicamente las locomotoras sufren con más frecuencia este tipo de daño que otros tipos de vehículos de las redes principales. Esto se debe a que las locomotoras junto con sus grandes ejes cargados, generalmente aplican fuerzas muy elevadas de tracción mientras circulan por curvas cerradas.

En ciertas ocasiones tras una deformación lateral de la llanta, en la zona de la banda de rodadura se pueden producir ahondamientos y también puede ser que el chaflán se desplace lateralmente debido a dicha deformación.

3.3.8. Colapso local de la banda de rodadura

Este tipo de daño localizado puede conducir a deformaciones laterales y a pérdidas de circularidad en las ruedas. Se generan disminuciones en las medidas del radio de la rueda que pueden llegar al milímetro de longitud. La detección de este tipo de daño se consigue por la activación de una señal basada en sensores de carga en ruedas, que reflejan sobrecargas verticales transmitidas a la vía.

Esta categoría de daño tiene en común con el RCF, que aparece como un fenómeno único en ruedas individuales y puede ocurrir en ausencia de martensita u otros tipos de daño térmico. Después del daño por deformación plástica lateral, la red de fisuras puede entonces desarrollarse hacia el centro de la banda de rodadura, lo que puede conducir a desprendimientos de material y la formación de cavidades locales en la rueda.

3.3.9. Aplanamiento de rueda. FLT

Los aplanamientos de rueda (wheelflats) es posiblemente la forma más clásica de daño. Este fenómeno está causado después del bloqueo total o parcial de un bogie mientras el vehículo está todavía en marcha, produciéndose deslizamientos sobre el riel. Esto da origen a elevados niveles de deslizamiento (diferencia entre la velocidad de rotación de la circunferencia de la rueda y la velocidad lineal del vehículo) entre la rueda fija o casi fija y la vía, ver Figura 31.

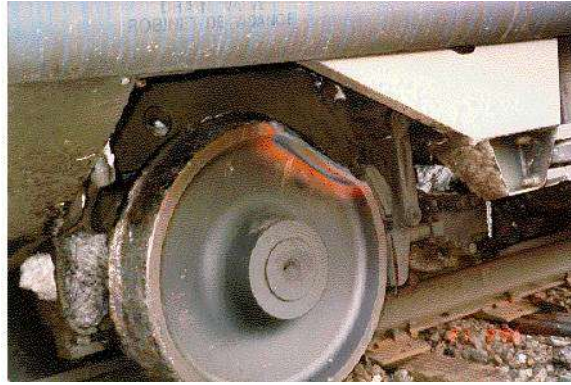


Figura 31: Aplanamiento, que causó el descarrilamiento de la formación, [23].

Una idea equivocada y muy común, es que el daño por planos de ruedas se causa por la acción abrasiva de la rueda, por el deslizamiento de ésta a lo largo de la cabeza del riel. Sin embargo es el daño térmico resultante de la entrada significativa de calor por el deslizamiento, el que causa la mayoría del daño; aunque en ocasiones puede también llevarse a cabo una pequeña cantidad de abrasión mecánica. Por el deslizamiento de la rueda sobre el riel, la fricción resultante calienta localmente la parte de contacto con la rueda, la cual puede alcanzar temperaturas significativas (800°-850 °C), necesarias para transformar el material de la rueda de acero perlítico en austenita. Como la parte de contacto en la rueda se enfría rápidamente después que el deslizamiento ha cesado, especialmente una vez que la rueda empieza a girar de nuevo y entra otra vez en contacto con la cabeza fría del riel, la austenita se transforma en martensita debido a este enfriamiento rápido (la martensita es una forma muy dura y frágil del acero), ver Figuras 32 y 33.

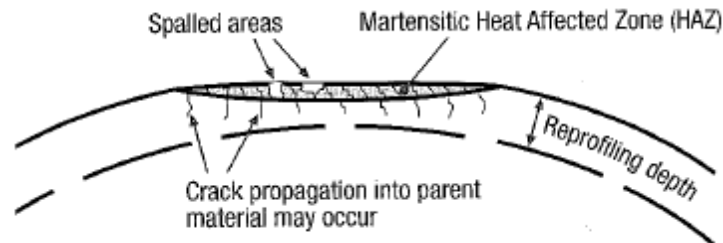


Figura 32: Representación esquemática de una sección de corte de un plano de rueda.



Figura33: Plano de rueda por el bloqueo del eje que ha comenzado a fisurarse superficialmente.

Debido a la aplicación de ciclos adicionales de cargas mecánicas en el área de contacto, se desarrollan fisuras en la zona afectada por el calor. Éstas se propagan hasta que la zona de acero martensítico endurecida, que ha sido afectada por el calor, empieza a desprenderse dejando cavidades en la banda de rodadura. Estas cavidades producen cargas mecánicas por el golpeteo, y conducen a pérdidas radiales significativas asociadas con los planos de rueda. Ocasionalmente la red de fisuras puede propagarse por debajo de la zona afectada por el calor dentro del material que la rodea.

Ambas ruedas del mismo eje convencional están expuestas a aplanamientos (o planos) de rueda significativos, inducidos por deslizamientos, que provocarán daños en dichas ruedas, aunque posiblemente con extensiones diferentes, exactamente en la misma posición angular. Los planos de ruedas pueden desaparecer con los reperfilados, aunque se debería tener en cuenta la profundidad del corte que es necesaria para eliminar todo el material afectado por el calor y todas las redes de fisuras restantes situadas bajo la capa de martensita. En las Figuras 34 y 35 se muestran algunos ejemplos.

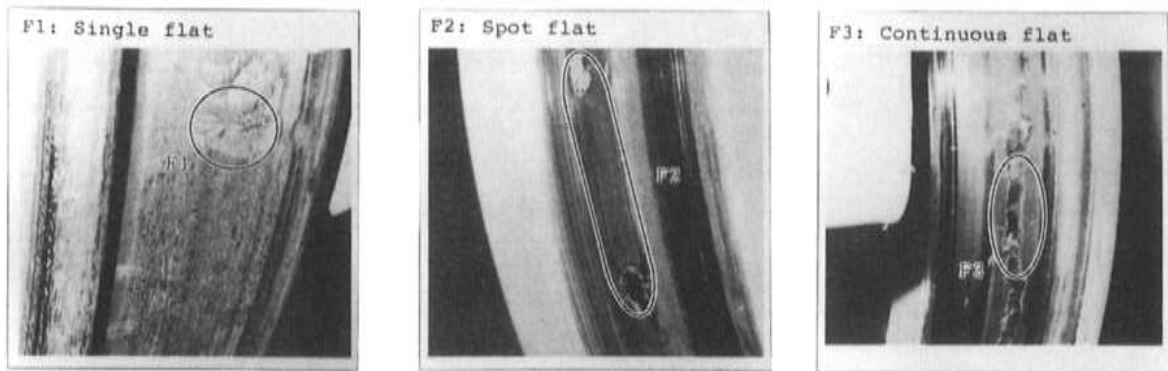


Figura 34: F1: Plano de rueda simple, significativo y reciente. F2: Plano de rueda como resultado de un bloqueo parcial del bogie. F3: Plano de rueda continuo con desprendimiento. [24].



Figura 35: Más ejemplos de aplanamientos, [22].

3.3.10. Formación de martensita después de un deslizamiento. SLP

El daño por deslizamiento puede parecer que solo afecta a la apariencia de la rueda, ya que la delgada banda plateada de martensita que aparece en la banda de rodadura puede desaparecer con la marcha. Lo que hay que tener en cuenta es que la banda plateada sí puede desaparecer de la banda de rodadura, pero sin embargo es bastante peligrosa ya que esencialmente es una prolongación del mecanismo de fallo que crea un plano de rueda. En este caso se pueden formar cavidades después de la fisuración superficial de la martensita por las zonas más afectadas por el calor.

Deslizamientos en la tracción para velocidades del vehículo bajas típicamente ocasionan daño por fatiga RCF3, mientras que deslizamientos para velocidades altas del vehículo es más normal que causen este efecto térmico distribuido. En ocasiones un deslizamiento longitudinal durante una frenada puede ser que no sea suficiente para provocar un plano en la rueda, a pesar del bloqueo total o parcial de la misma; pero puede ocasionar esta forma distribuida de daño térmico.

En el caso de deslizamientos de cierta intensidad, se requiere una corrección vía reperfilado para eliminar la zona afectada por el calor y como consecuencia las redes de fisuras.

3.3.11. Sobrecarga térmica. HOT

En vehículos donde la banda de rodadura se usa para frenar el vehículo, existen niveles significativos de calor transferido desde la llanta hacia el interior de la rueda, como consecuencia de la conversión de energía cinética en energía térmica. El arrastre de las zapatas, frenadas prolongadas u otras acciones inapropiadas, afectan a la integridad de la banda de rodadura; una rueda puede calentarse más allá de su capacidad térmica para la que fue diseñada y por tanto sufrir una sobrecarga térmica.



Figura 36: Rueda que ha sufrido una sobrecarga térmica, destaca la decoloración y pérdida de la pintura, [25, 26].

Los efectos visuales de las sobrecargas térmicas, son la decoloración de la pintura de la llanta y una decoloración del acero de la rueda en la banda de rodadura, por la cara de la llanta y también enrojecimiento de la llanta, ver Figuras 36 y 37. Las consecuencias son el cambio de signo de las tensiones residuales de compresión existentes en la llanta y/o el inicio de fisuras laterales en la banda de rodadura si las temperaturas y duración del sobrecalentamiento son excesivas.



Figura 37: Sobrecalentamiento de rueda indicado por enrojecimiento, [27].

3.3.12. Fisuras térmicas laterales. LAT

Después de una sobrecarga térmica por la acción de frenado, se pueden desarrollar fisuras térmicas laterales en la banda de rodadura. La presencia de fisuras térmicas laterales es un factor relevante en la seguridad, ya que estas fisuras pueden propagarse lateral y radialmente a través de la llanta y hacia el velo de la rueda. En el caso extremo, puede producirse un fallo catastrófico por la aplicación de cargas mecánicas y térmicas posteriores a ese inicio de fisura. El desarrollo de fisuras térmicas laterales puede, pero no necesariamente, indicar que las tensiones residuales protectoras de la llanta han sido neutralizadas o que han cambiado de signo como consecuencia del sobrecalentamiento anterior de la rueda.



Figura 38: Fisura lateral y llanta completamente fisurada tras un sobrecalentamiento, [26, 28].

El comienzo de las fisuras laterales térmicas no solo dependerá de la temperatura de la superficie de la banda de rodadura que se alcanza, si no también del gradiente térmico que existe en la llanta y del periodo de duración. En la Figura 38, primero se muestra una fisura lateral en la banda de rodadura y, en la imagen de la derecha, una llanta completamente fisurada con su fisura radial extendiéndose hacia el velo de la rueda.

3.3.13. Marcas en la banda de rodadura. INDT

Las hendiduras o marcas en la banda de rodadura se originan por la existencia de cuerpos extraños en la cabeza de la vía, ver Figuras 39 y 40.



Figura 39: Marcas repetidas debidas a cuerpos extraños en el riel; hendidura orientada longitudinalmente.



Figura 40: Nieve induce este fenómeno en la banda de rodadura, [16].

En ocasiones, se ha sabido de la existencia de cuerpos extraños en las vías que han creado estas imperfecciones en las ruedas, colocados deliberadamente en la cabeza del riel como resultado de un acto de vandalismo. En la mayoría de los casos este tipo de daño afecta sólo a la apariencia de la rueda, aunque si se exceden los límites expuestos en el manual de mantenimiento, entonces las ruedas afectadas deben ser reperfiladas. Partículas de arena desde los sistemas de arena de a bordo para mejorar la tracción o frenado pueden también crear estas marcas en la banda de rodadura. El tamaño de las marcas será por tanto proporcional al tamaño de grano de la arena usada en la respectiva red. A veces el efecto de las marcas de la rueda por la arena tiene la apariencia de un “cielo estrellado”, ver Figura 41.



Figura 41: Marcas sobre la banda de rodadura.

3.3.14. Deformación de la punta de pestaña

El tipo de daño de deformación del extremo de la pestaña, predomina en tranvías y vehículos ferroviarios ligeros que circulan con el extremo de la pestaña en el interior de rieles acanalados o por el paso de cruces y desvíos, ver Figuras 42 y 43.

Irregularidades en los perfiles y cuerpos extraños junto con los rieles acanalados, pueden también dar origen al incremento de las presiones de contacto localizadas en el extremo de la pestaña, que causan deformación plástica en dicha pestaña. Se pueden desarrollar por las cargas repetidas, o por choques del extremo de la pestaña. Los reperfilados de la banda de rodadura de la rueda restauran la rueda y la condición de la pestaña, aunque se necesitan medidas adicionales para prevenir que se repita tal efecto.



Figura 42: Pestaña con choques en su extremo, [27].



Figura 43: Pestaña aplanada, [29].

3.3.15. Desprendimientos en la pestaña

Tipo de daño que afecta a tranvías y vehículos ferroviarios ligeros. Típicamente se origina por la existencia de una elevada presión de contacto de la pestaña de la rueda en contacto con el riel, el cual tiene una parte cortante que interacciona con la pestaña. En principio esta parte cortante del riel debe estar a una altura que garantice la no interacción con la pestaña; pero por posibles desgastes tanto en la rueda como en la cabeza del riel, la parte cortante se aproxima a la pestaña. También se forma tras circular con la punta de la pestaña por vías acanaladas (especialmente tranvías en cruces y desvíos) con irregularidades localizadas o cuerpos extraños en las ranuras que causan un incremento de la presión de contacto en la base de la pestaña.

El reperfilado de la banda de rodadura restaura las condiciones iniciales de la geometría del perfil de rodadura de la pestaña, aunque se deben tomar medidas adicionales para evitar que este tipo de daño se repita.

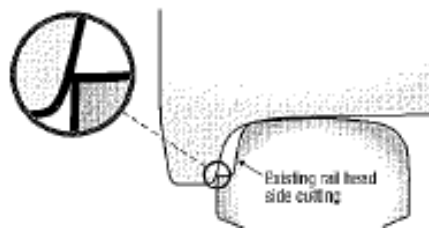


Figura 44: Representación esquemática de la interacción de la parte alta de la pestaña con un riel que tiene un nivel significativo de parte cortante.

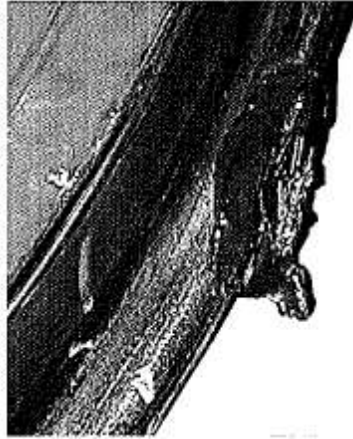


Figura 45: Pestaña afectada por este tipo de daño

3.3.16. Defectos en el velo

Son fisuras circunferenciales que, partiendo de una zona defectuosa, se desarrollan por fatiga. Este tipo de fisuras pueden afectar a todo el espesor del velo y alcanzar grandes desarrollos circunferenciales, hasta producir la rotura brusca de la rueda. Estas zonas defectuosas pueden ser defectos metalúrgicos, pliegues de forja o laminación, etc., capaces de generar una fisura bajo los grandes esfuerzos alternativos a los que se ve sometido el velo. También pueden producirse por entallas de mecanizado o por un diseño incorrecto (partes delgadas, taladros de equilibrado, radios de acuerdo cerrados, zonas de rugosidad elevada).

Las tensiones en servicio, como son las producidas en curvas, producen en el velo un fenómeno de fatiga. Hasta que la rueda se ha desgastado a sus dimensiones mínimas aceptables, el número de ciclos de carga puede haber sido del orden de 10^9 . El momento más peligroso desde el punto de vista de la fatiga, es el paso a máxima velocidad por la curva de radio más pequeño.

La zona de transición entre la llanta y el velo es una zona peligrosa, donde el momento de flexión alternado causa fisuras de fatiga en el interior de las ruedas. Otra zona peligrosa es la zona del velo próximo al eje, donde los valores de resistencia a fractura son los más pequeños en toda la rueda.

El desarrollo de fisuras se asocia a las altas tensiones a tracción generadas tras frenadas prolongadas y bajo la acción de altas cargas verticales y laterales.



Figura 46: Fisura circunferencial desarrollada en el velo de una rueda.

3.3.17. Defectos en el cubo

Generalmente se corresponden con fisuras de progresión axial producidas por defectos internos o aprietes excesivos durante la operación de calado. Este tipo de defecto no es muy común.

3.4. Mecanismos de agrietamiento de ruedas de tren

Como se ha indicado en el apartado anterior, en la mayoría de los distintos tipos de daño están implicadas las fisuras. Las fisuras en las ruedas son importantes por tres razones: una es la **seguridad**, debido al peligro de rotura de la rueda o al peligro de que parte de la pestaña o de la banda de rodadura se desprenda; otra es el **confort**, ya que las fisuras pueden llegar a desarrollar cavidades que producen altas vibraciones y empeoran el confort de los viajeros y por último, el **consumo de la llanta**, ya que, para eliminar todas las fisuras, se debe mecanizar la rueda.

Las fisuras pueden producirse por muchos motivos, aunque hoy en día no se entienden completamente todas las razones que las producen. Las fisuras nacen a partir de defectos. Los defectos pueden ser de **dos tipos**:

- Defectos producidos durante la fabricación.
- Defectos producidos durante el servicio y sujetos a observación en las labores de mantenimiento, estos defectos suelen ser del tipo fisuras de fatiga, defectos de corrosión o una combinación de ambos.

Cuando se inicia una fisura, bien debido a un proceso de fatiga o por una imperfección en el material original, es importante conocer bajo qué condiciones la fisura crece. Las fisuras crecen básicamente debido a la acción de los esfuerzos mecánicos, mientras que los esfuerzos térmicos juegan un papel importante en la nucleación de las mismas, en su crecimiento hasta alcanzar el valor umbral y en la generación de tensiones residuales.

La formación de fisuras y su propagación se debe principalmente a las tensiones de corte. En una rueda sujeta a contacto de rodadura pura la tensión de corte mayor se da entre los 3 y 5 mm por debajo de la superficie. Si además se aplica una fuerza de

fricción, como es la del frenado por zapata, ésta aumentará la tensión de corte en la superficie, dando lugar a dos zonas con una alta tensión de corte.

Es importante identificar las ruedas que contengan fisuras de fatiga antes de que se produzca una fractura rápida, especialmente en zonas con climas fríos, pues la resistencia a la fractura de los aceros en estas condiciones es menor. La magnitud de la carga, así como la geometría de contacto juegan un papel crucial en el crecimiento de las fisuras.

Para conseguir un estricto control sobre las fisuras en ruedas ferroviarias se debe determinar:

1. Tipo de defectos que se pueden producir y su posición. Uno de los principales problemas que se plantean es detectar las posibles zonas de desarrollo de fisuras a partir de dichos defectos. La principal dificultad, es que en las ruedas existen numerosas localizaciones en las que una fisura podría llegar a desarrollarse y además, dependen de muchos factores.

2. Modo de fallo esperado.

3. Vida útil a partir de la detección de una fisura.

4. Si el resultado del fallo será catastrófico o simplemente producirá pérdidas económicas (necesidad de reperfilear la rueda).

5. Tamaño de fisura crítico que produce rotura, dependiente de muchos factores. No existen normas que definan los tamaños mínimos admisibles. Existen numerosos estudios que tratan de calcular dicho tamaño de grieta crítica, pero aún no existen estándares definitivos.

6. El número de inspecciones a realizar a lo largo de la vida de la rueda.

Las ruedas que son más propicias a la aparición de fisuras son aquellas que han sufrido un sobrecalentamiento como consecuencia de una frenada prolongada, debido a que las fuerzas de compresión residuales conseguidas tras el tratamiento térmico durante su fabricación, se transforman en tensiones de tracción, que ayudan a la iniciación y propagación de las fisuras.

De todos los defectos detectados en las ruedas ferroviarias, se destacan las fisuras y se clasifican según las distintas profundidades desde la banda de rodadura a la que puedan existir, como son las superficiales, sub-superficiales y las internas.

3.4.1. Fisuras superficiales (“spalling”)

Son fisuras que se propagan hacia el interior de la llanta, llegando a producir pequeños desprendimientos de material. Estas fisuras se producen por el deslizamiento de las ruedas o por la acumulación de deformación plástica en la superficie de rodadura, ver Figura 47.



Figura 47: Desprendimiento de metal de grietas finas superficiales que se encuentran unidas, [30].

3.4.1.1. Fisuras superficiales producidas por deslizamiento de ruedas

La fricción entre rueda y riel introduce una alta carga térmica local en la banda de rodadura, llegando hasta temperaturas próximas a los 800°C. A esta temperatura disminuye el límite elástico en esa zona, pudiendo aparecer deformación plástica. Cuando la rueda vuelva a girar se produce un rápido enfriamiento, produciéndose una transformación de fase en la banda de rodadura, formándose martensita. La martensita es frágil, con una estructura cristalina que tiene un coeficiente de expansión volumétrico de un 0.5% comparado con la estructura perlítica a temperatura ambiente. Debido a la citada expansión, se producen tensiones residuales compresivas en la estructura martensítica y tensiones residuales de tracción en el material de alrededor. Al igual que sucede con una rueda con planos, si sigue en servicio y la zona afectada por el calor no se elimina por mecanizado, se formarán grietas de fatiga por la acción de las tensiones de contacto de rodadura. La resistencia a la propagación de fisuras en la martensita es prácticamente nula; sin embargo no es seguro que las fisuras continúen propagándose una vez que entran en el material base. Se produce deformación superficial y se forman grietas en el área de contacto entre la pequeña capa de martensita y la zona de perlita que la rodea. Mientras la rueda se mueva se favorece el crecimiento de grietas, ver Figuras 48 y 49. Una vez que las fisuras crecen, se empieza a producir desprendimiento de pequeños trozos de material, haciendo que de nuevo aumente el nivel de impacto. Las cavidades producidas son del orden de entre 1 y 5 mm de profundidad, rodeadas de fisuras con profundidades de hasta 10 y 18 mm bajo la banda de rodadura.

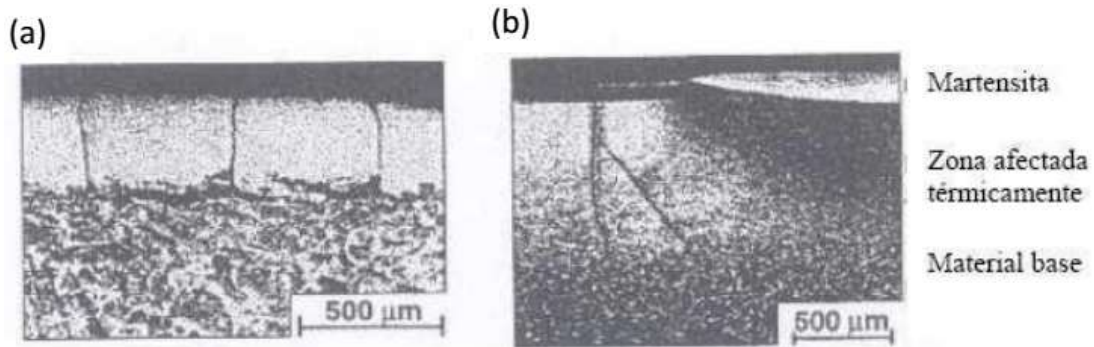


Figura 48: Zona afectada por el calor y desarrollo de grietas en la misma: (a) la zona afecta por el calor está claramente diferenciada del material base; (b) la capa de martensita no está tan claramente diferenciada.

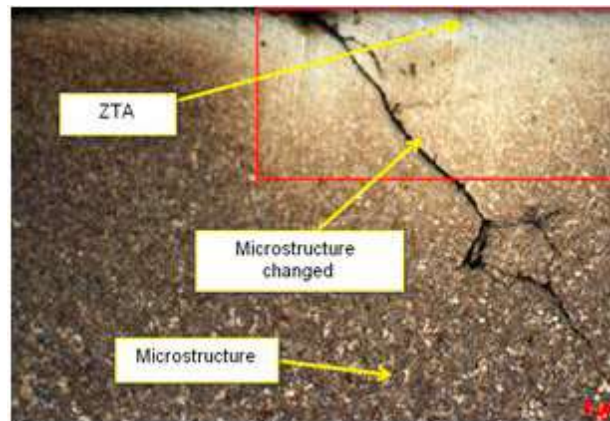


Figura 49: Microestructura de zona afectada por el calor, [31].

3.4.1.2. Fisuras superficiales producidas por deformación plástica en la superficie de la banda de rodadura (ratcheting)

Cuando la carga está por encima del límite elástico de la rueda, se produce flujo plástico, produciéndose tensiones residuales y endureciéndose el material por deformación. El fallo ocurre por ciclo de fatiga de baja frecuencia, tratándose de un fenómeno que ocurre cerca de la superficie de rodadura y su principal causa son las altas fuerzas de fricción. Es otro de los defectos originados por el fenómeno de FCR; en este caso su apariencia es similar a la del daño en rieles conocido como head check; producido también por FCR. El nombre ratcheting (trinquete en castellano) proviene de la apariencia que le queda a la superficie de la rueda, que hace recordar a un trinquete.

Cuando la ductilidad de la superficie del material está agotada se desarrollan grietas que suelen orientarse aproximadamente perpendicular a la dirección de deslizamiento. Esas fisuras, producidas por efecto de la deformación, se inician en el material y se propagan a lo largo de los granos deformados plásticamente, propagándose inicialmente en la superficie con un ángulo poco profundo siguiendo una dirección casi axial. Por último suelen desviarse en dirección circunferencial-radial, con una profundidad entre 1.5 y 2 mm, produciéndose la rotura final cuando una parte de la fisura llega a la superficie o se encuentra con otra fisura, desprendiéndose una parte de la banda de rodadura.

En la figura 50 se muestran ejemplos de daños de RDF, de los tipos descritos aquí y en la sección siguiente.

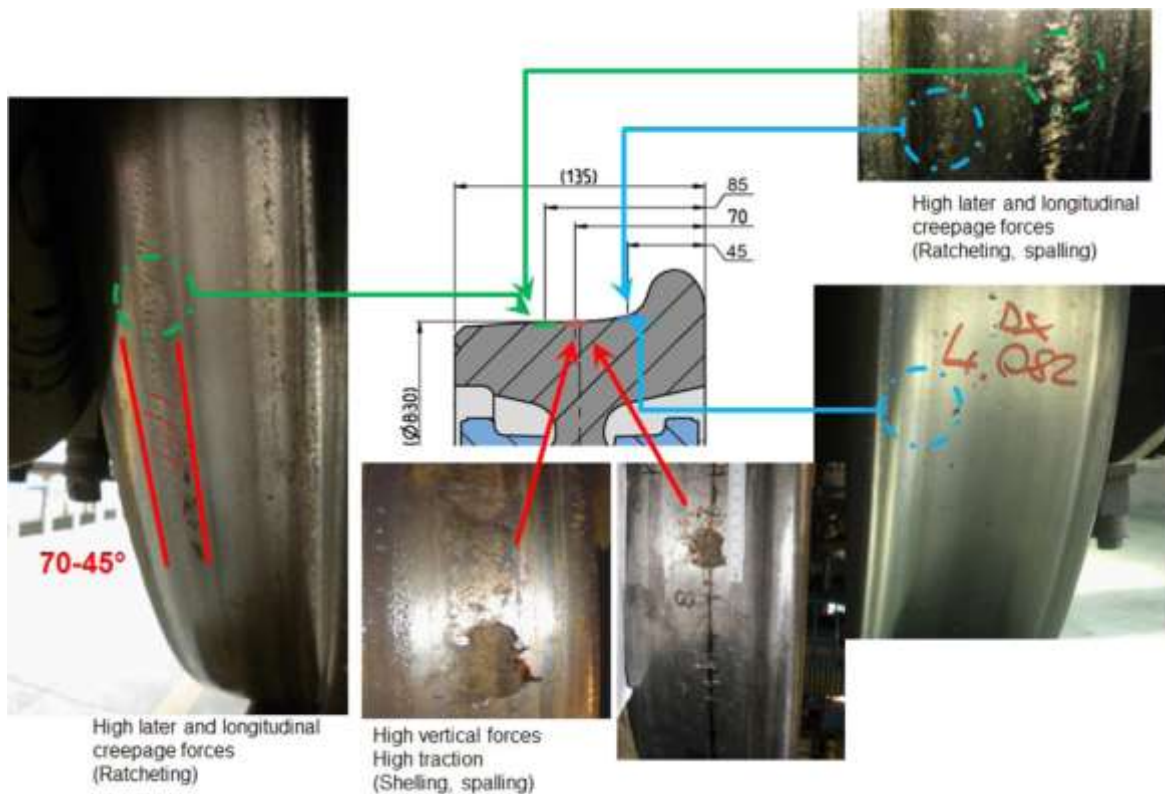


Figura 50: Ejemplos de RCF sobre el perfil de rodadura, [32].

3.4.1.3. Fisuras sub-superficiales. Exfoliaciones (shelling, spalling)

La rotura de la banda de rodadura por fatiga, producida por el defecto conocido como “shelling”, es uno de los defectos de ruedas más comunes. Este defecto está asociado a altas cargas y bajos niveles de deslizamiento, produciéndose la pérdida de material causada por RCF. Durante el ciclo de contacto el daño sub-superficial se acumula dando lugar a pequeñas grietas horizontales. Bajo ciclos de carga estas grietas se propagan por debajo la superficie hasta que el campo de tensiones hace que la grieta cambie de dirección hacia la superficie, ocasionando pérdida de material, ver Figuras 51 y 52. Se suele indicar como shelling cuando el daño es una rotura localizada que se incrementa con el uso, teniendo diferentes estadios Spalling se refiere a un descascaramiento más superficial en gran parte de la banda de rodadura. Ambos tienen su origen en el fenómeno de FCR.



Figura 51: Foto de defecto shelling, [30].



Figura 52: Foto de defecto spalling, [22].

El shelling, se caracteriza por tener forma de anillo, paralelo a la superficie de rodadura. Se trata de defectos producidos por fatiga y crecimiento de grietas cerca de la banda de rodadura, a una profundidad de unos pocos milímetros, alrededor de unos 6 mm. Se supone que las fisuras se inician a una profundidad de entre los 4 y los 5 mm, propagándose hasta una profundidad de unos 20 mm, desviándose a esta profundidad en una fisura circunferencial, observándose grietas de entre 15 y 300 mm antes de la rotura del material.

Los principales puntos de nucleación de grietas son los bordes de la interfase ferrita-perlita y las inclusiones no metálicas. En la interfase ferrita-perlita se revelan microgrietas. El proceso depende del material y de las condiciones de operación, pero en todos los casos se manifiesta por el inicio y propagación de fisuras en capas próximas a la superficie hasta formar desprendimientos que dan lugar a agujeros o descascaramientos. El inicio de las grietas por fatiga se asocia con la deformación local cíclica y plástica. Una vez que las fisuras se forman, se propagan rápidamente, aparentemente paralelas a la superficie, a la profundidad de la mayor tensión de contacto de cortadura.

Este tipo de defectos pueden ser muy peligrosos ya que producen el desarrollo de fisuras que crecen circunferencialmente; pudiendo llegar a desprender secciones importantes de material. Las malas condiciones del riel, cargas y velocidades excesivas, dureza de la rueda insuficiente, ruedas demasiado pequeñas para la carga a sostener, son factores que contribuyen a la formación de shelling, predominando este tipo de daño en ruedas frenadas por discos.

Las ruedas con “shelling” y “spalling” experimentan mayores cargas de impacto como consecuencia del golpeteo de las ruedas ovaladas que aceleran el inicio y propagación de las fisuras, además de poder provocar daño a diferentes elementos del tren, como los rodamientos o las suspensiones.

3.4.1.4. Fisuras internas por inclusiones profundas (shattering)

Este modo de fallo, normalmente provocado por inclusiones internas situadas en zonas de contacto sometidas a altas tensiones, puede provocar pérdida de material de la llanta y pestaña. Se pueden iniciar en otros defectos de fabricación como los poros o huecos. Estos defectos causan un alto incremento local en las tensiones y deformaciones.

En la práctica ningún material está libre de defectos y sus efectos dependen de su tamaño, forma y orientación. Las fisuras shattering se inician por inclusiones de óxido de aluminio en las ruedas forjadas. Las inclusiones de alúmina pueden tener varios orígenes: productos de desoxidación que no desaparecen durante el fundido, re-oxidación durante el vertido del lingote o trozos de material cerámico del horno o de los cucharones refractarios.

La homogeneidad, la disminución de inclusiones, poros y otros defectos de los aceros usados para componentes ferroviarios, constituyen mejoras destacables en lo que concierne a los proveedores de ruedas. Estas mejoras fueron de gran importancia especialmente para el incremento de velocidades. Se han incorporado medidas de calidad de aceros, así como muchos métodos de END para evitar ruedas con shattering, y otros defectos. La medida de calidad de acero así como los END se realizan después del tratamiento térmico y del mecanizado de las ruedas.

Estos defectos se propagan normalmente paralelos a la banda de rodadura hacia el exterior, antes que propagarse hacia el interior de la rueda, ver Figura 53. Una vez que la fisura se ha iniciado, la propagación es rápida bajo las condiciones normales de carga de la rueda. Sin embargo para que se inicie la fisura es necesario que se produzca una gran carga, como un impacto.



Figura 53: Fallo en rueda por shattering.

La mayoría de las ruedas afectadas por este tipo de daño, son ruedas relativamente nuevas, habiendo también un pico para ruedas próximas al fin de su vida, esto sugiere que la mayoría de las llantas con shattering tienen fallos tempranos, que ocurren

principalmente debido a un hueco o una inclusión de tamaño crítico que causa el inicio de la fisura. También cuando la rueda sufre fuertes impactos y la llanta tiene una inclusión de menor tamaño, se puede formar una fisura. Tras uno o varios reperfilados y vuelta al servicio, la fisura continuará creciendo convirtiéndose en daño shattering. Esto explica el que aparezcan también ruedas con este tipo de daño casi al final de su vida útil.

Se cree que las inclusiones de óxido de aluminio son las causantes del inicio de estas fisuras en las ruedas forjadas, ya que en el origen de las grietas se han encontrado este tipo de inclusiones. El largo de estas fisuras es de 1 a 5 mm y el ancho entre 0.3 y 1 mm. En los trenes de alta velocidad, este tipo de defectos suele aparecer después de reperfilado una rueda desgastada, siendo entonces la extensión típica entre 10 y 15 mm. El área de interés para este tipo de delaminaciones suele ser una banda entre 60 y 70 mm de la cara externa de la rueda comenzando por la zona plana, ver Figura 54.

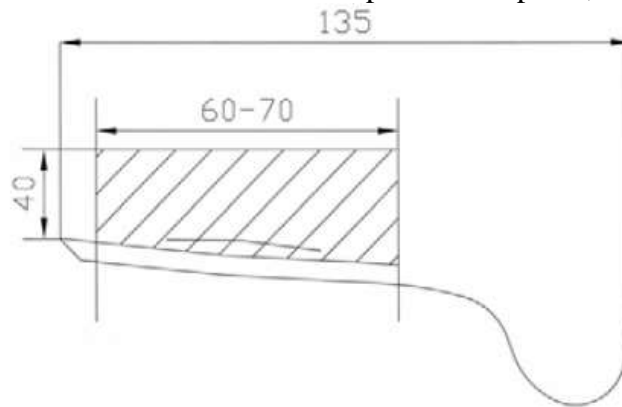


Figura 54: Zona de localización de fisuras circunferenciales en la llanta (medidas en mm).

3.4.1.5. Fatiga térmica, [33]

Son fisuras muy peligrosas para las ruedas, y no se deben confundir con RCF ya que tienen distinta orientación, estas forman un ángulo cercano a 0° con respecto al eje de la rueda. Son frecuentes en vagones de mercancías donde los frenos se aplican directamente sobre la banda de rodadura. Se deben a frenadas anormales, a la introducción de un flujo de calor en zonas de pequeña sección de la llanta o a la fricción de materiales que son agresivos al acero.

Estas fisuras se originan por fatiga como consecuencia del resultado de distintos ciclos térmicos. Tras su origen, si existe un campo de tensiones de tracción se propagan en dirección axial, hasta el momento en que se produce la fractura frágil, donde se produce el crecimiento inestable de la grieta que provoca la rotura catastrófica de la rueda. Otra posibilidad es que estas fisuras, originadas en la superficie como fisuras axiales, se desvíen bajo la influencia de las cargas mecánicas en grietas circunferenciales. Generalmente este tipo de fisuras se orientan perpendicularmente a la dirección de rodadura, ver Figura 55. Para las ruedas forjadas, las fisuras térmicas aparecen con más frecuencia en la banda de rodadura, en las proximidades de la cara externa, zona 1 de la Figura 18 (b). Sin embargo, para las ruedas coladas es más frecuente encontrar este tipo de grietas en las proximidades de la pestaña, zona 2 de la Figura 18 (b). La posición típica de este tipo de defecto se muestra en la Figura 57; de ellas la posición en la esquina es la más peligrosa, ya que puede producir que la rueda se abra. En el caso de vehículos ferroviarios, donde los frenos se aplican sobre discos de

freno, las fisuras térmicas pueden aparecer debido a un deslizamiento de las ruedas, ya sea por la diferencia en la velocidad de giro de las ruedas respecto al riel, o por estar éstas desalineadas o desplazadas con respecto al centro de la vía.

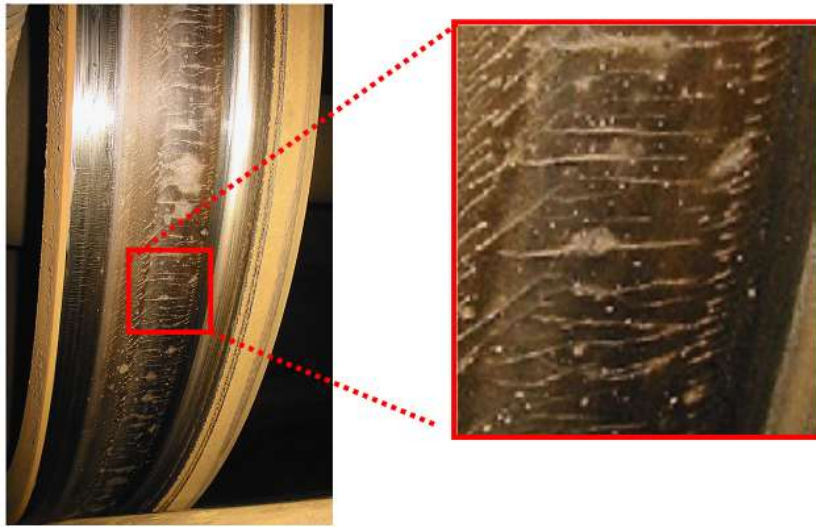


Figura 55: Fisuras superficiales sobre la banda de rodadura, [20].

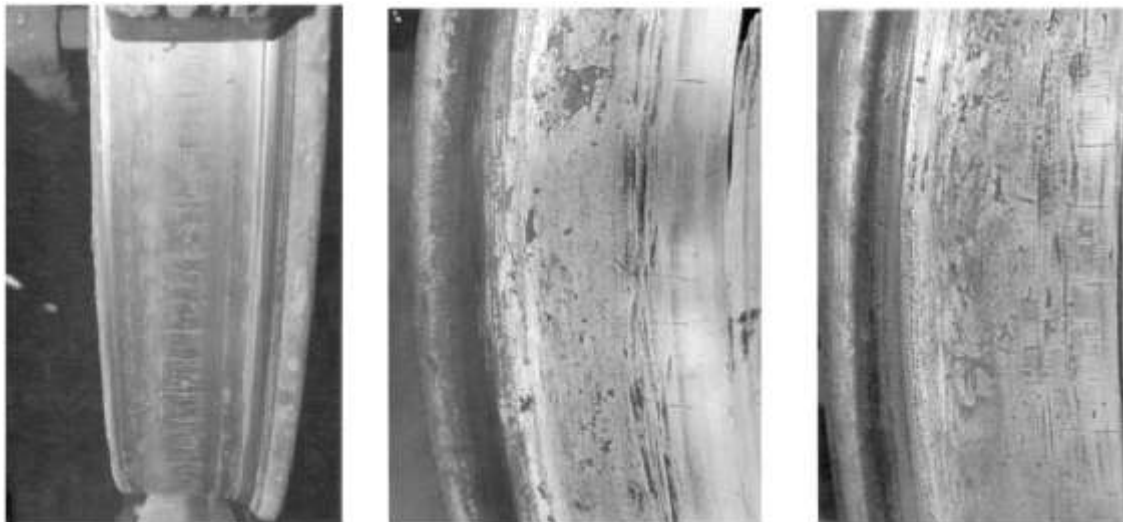


Figura 56: Ejemplos de fisuras térmicas durante su evolución [22].

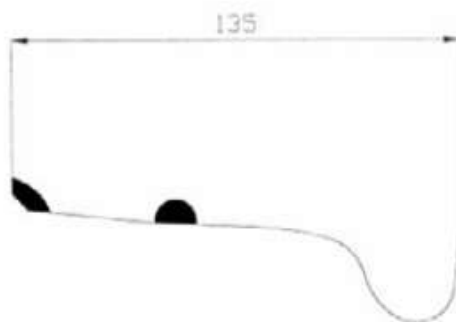


Figura 57: Zona de localización de fisuras térmicas en la llanta (medidas en mm).

3.4.1.6 Ruedas escamadas

El escamado es la acumulación de material metálico en la superficie de la banda de rodadura. Por lo general, se atribuye a cuando los frenos tienen tendencia a adherirse a la rueda, esto hace que la rueda resbale o se deslice sobre el riel, ocasionando que este se caliente hasta que el material se ablanda lo suficiente como para fluir sobre la superficie de la banda de rodadura. Ese material del riel que fluyó sobre la banda de rodadura del riel se mezcla con polvo de los frenos y otros materiales extraños y se deposita nuevamente en la rueda, donde se enfría en capas, lo que le da a la banda una apariencia escamosa. Las escamas pueden cubrir toda la superficie de la rueda o cualquier parte de ella. El método utilizado para determinar la gravedad de cualquier escamado determinado es medir su altura desde la superficie normal de la rueda, ver Figura 60.



Figura 58: Fotografías de distintos etapas de la evolución del escamado, [22].

4. Ensayos no destructivos aplicados a ruedas

En esta sección se describen las distintas metodologías disponibles para la evaluación no destructiva de las ruedas de trenes no sólo en el ámbito local sino también externo. Estas tecnologías se pueden aplicar en diversas condiciones, algunas de ellas se pueden aplicar de manera simultánea en cada uno de los distintos escenarios. A continuación se presentan las distintas posibilidades de inspección de las ruedas ferroviarias, algunas de estas son estudios en laboratorios y otras son soluciones para mediciones en taller, mediciones en servicio y mediciones al costado de la vía.

4.1. Inspecciones en taller

Las ruedas ferroviarias se inspeccionan regularmente en los talleres en sus fases periódicas cortas y largas. La evaluación de cientos de ruedas en un día requiere equipo apropiado para probar múltiples ruedas montadas debajo de los trenes. En algunos casos la rueda se desmonta, aunque por motivos económicos, preferentemente se trata de realizar la inspección del par de ruedas montado en el eje.

4.1.1. Inspección visual o manual

Existen numerosas galgas o plantillas que se colocan sobre la rueda y comparan varios puntos del perfil con los distintos calibres de medición, ya que cada uno de estos instrumentos puede ser usado para detectar más de un problema. Brindan información respecto a que tan grande o grave es el defecto que presenta una rueda. Para su empleo se requiere de operadores calificados debido a que las deformaciones plásticas que presentan las ruedas en servicio pueden generar una lectura de datos errónea. Las inspecciones visuales o manuales en servicio son cada vez menos frecuentes por su elevado costo en tiempo y baja fiabilidad. No obstante, son prácticas que se emplean sistemáticamente cuando se han detectado defectos importantes por medios automáticos. Un ejemplo de calibre manual se muestra en la Figura 59.

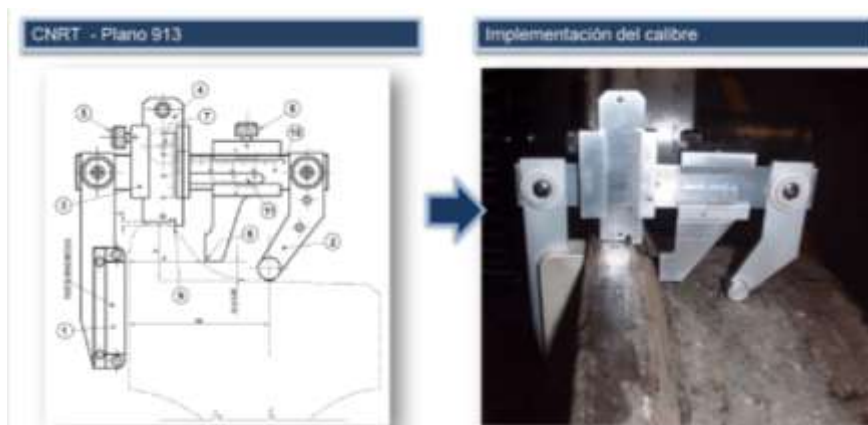


Figura 59: Uso de calibre manual para medir pestaña de la rueda [34].

Como una mejora a los elementos mencionados anteriormente, podemos mencionar a los instrumentos portátiles con palpadores mecánicos automatizados, estos equipos son capaces de obtener la totalidad de su perfil en una sección transversal y permiten

monitorear las ruedas o ver el estado de estas. El *miniprof*[®], Figura 60, es uno de esos instrumentos comerciales que ayuda a mejorar las tareas de inspección, es portable y de fácil operación. Cuenta con un dedo sensor o palpador que recorre en forma automática a través de una sección transversal y permite medir y controlar el perfil de una rueda, [35].



Figura 60: *Miniprof*[®], instrumento para realizar la medición digital del perfil de una rueda, [36].

4.1.2. Análisis acústico.

Se trata de un método antiguo. Las ruedas con defectos, si son golpeadas con un martillo, suenan de diferente manera que las ruedas que no tienen defectos. La rueda deberá ser excitada, de manera que vibre, analizándose el sonido obtenido. La aparición de discontinuidades en la rueda, como son las grietas, provoca distintos modos de vibración y como consecuencia distintos sonidos.

Es importante hacer la distinción entre este método antiguo y los modernos métodos de estudio de vibraciones, ya que en este caso aunque se están analizando las vibraciones, el objetivo del mismo es el estudio y análisis del sonido que emite la rueda.

Anteriormente se destinaba personal específico para estas tareas. Eran ferroviarios que, en las paradas en las estaciones, recorrían los trenes golpeando las ruedas con un martillo con objeto de descubrir fisuras o roturas en las mismas por el sonido que producía el golpe. Hoy en día este método se puede efectuar con sensores que registren el sonido y lo analicen (método END por emisión acústica), ver Figura 63, dejando a un lado la subjetividad del operador.



Figura 61: Foto de ensayo de emisión acústica con transductores piezoeléctricos.

4.1.3. Partículas magnéticas

La inspección mediante partículas magnéticas es un método de ensayo no destructivo utilizado tanto para el control superficial como sub superficial. Esta técnica se utiliza en materiales ferromagnéticos permitiendo detectar grietas y otras discontinuidades tanto superficiales como próximas a la superficie. Consiste básicamente en magnetizar la pieza a inspeccionar, aplicar las partículas magnéticas (polvo fino de limaduras de hierro) y evaluar las indicaciones producidas por la agrupación de las partículas en ciertos puntos. Podemos decir que las ventajas de este método son que es bastante sencillo, y su costo es bajo, es capaz de detectar defectos de 1 μm de ancho y es bastante rápido comparado con otros métodos. Las limitaciones de este método son que las piezas deben ser ferromagnéticas para poder ser inspeccionadas, hay que realizar una desmagnetización después del ensayo y que cuando existen uniones con diferentes propiedades magnéticas, rugosidades, o cubiertas con superficies no magnéticas pueden aparecer falsos positivos, que indicarán un fallo cuando no lo hay. Los ensayos con partículas magnéticas pueden ser realizados con partículas visibles o con partículas fluorescentes.

En la Figura 62 se muestra un sistema de inspección capaz de modificar su corriente de magnetización para ajustarse a los distintos diámetros de ruedas, cuenta además con un sistema de visión compuesto por cámaras para escanear toda la rueda y por ultimo un método de procesamiento de señales, para identificar eficientemente las señales de los defectos que registran las cámaras, [37].

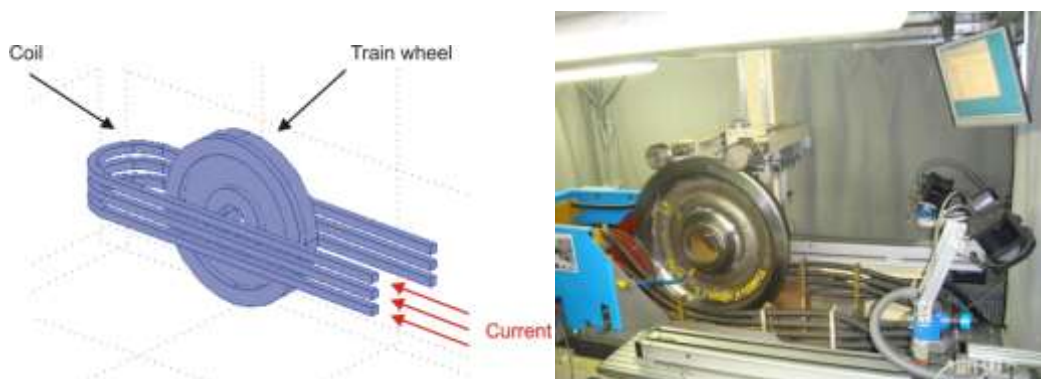


Figura 62: Ensayo con partículas magnéticas en ruedas, monitoreado con cámaras.

4.1.4. Corrientes inducidas y métodos de evaluación de flujo magnético

El ensayo no destructivo por corrientes inducidas consiste en la generación de un campo magnético alterno mediante una bobina excitadora, el cual debido a la ley de Faraday-Lenz generará sobre otro cuerpo (en este caso una muestra conductora) una corriente inducida, la cual puede ser detectada mediante una segunda bobina (o la misma bobina excitadora). En el caso de producirse una variación en el paso de la corriente, la bobina detectora registrará una variación, ya sea en la amplitud o en la fase, la cual se debe a la presencia de un defecto o una discontinuidad. Con este método se pueden detectar fisuras superficiales o sub-superficiales o cambios en las propiedades del material. Como ejemplo, se puede mencionar que se utilizan equipos con varios palpadores para la detección de defectos de fatiga por contacto de rodadura y fatiga térmica, entre otros. Una implementación es el que ha desarrollado la empresa INTRON PLUS de Rusia, para la inspección de pares de ruedas de vagones de ferrocarril. Los

sistemas de corrientes inducidas permiten la detección de grietas en toda la superficie de la rueda y además evaluar los discos de frenos, [38]; otra implementación en servicio se muestra en la Figura 63.



Figura 63: Dispositivo de inspección por corrientes inducidas en ruedas de tren, [39].

Otro ejemplo que podemos citar de la bibliografía [40] es una aplicación donde se utiliza la permeabilidad y la fuerza coercitiva para controlar el daño por fatiga. Se evalúa la alteración en un coeficiente definido por estas propiedades magnéticas. Este coeficiente es una función de las deformaciones plásticas o de fatiga y el número de ciclos de fatiga. En la Figura 64, se muestran los resultados del monitoreo circunferencial de una rueda de ferrocarril. El daño por fatiga a 120 ° es claramente observable.

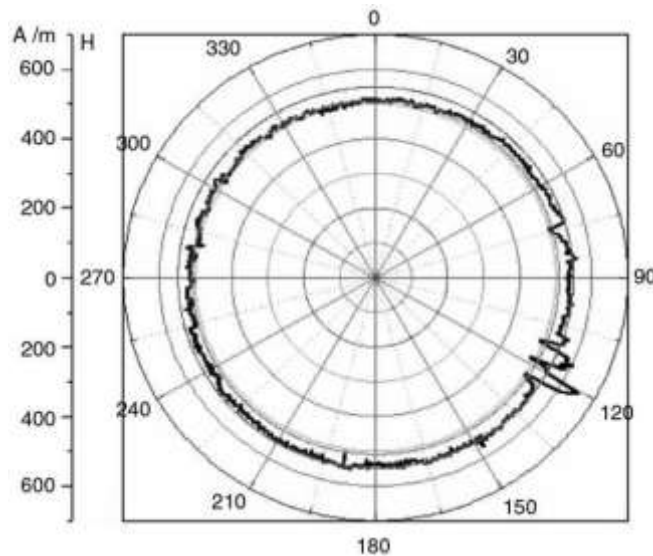


Figura 64: Diagrama circunferencial de una evaluación magnética [38].

Por otro lado en la figura 65 se muestra un diseño novedoso de escáner tipo array para la evaluación del flujo magnético producido por un imán, [41]; en donde utiliza una serie de sensores Hall integrados linealmente que forman una cámara magnética para la detección de defectos de la banda de rodadura.

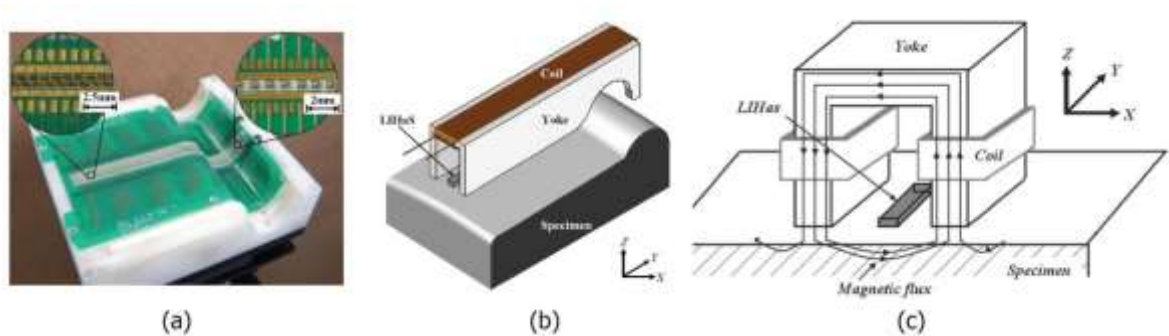


Figura 65: (a) Conjunto de sensores Hall en una oblea, (b) y (c) bobina electromagnética de tipo yugo.

Esta cámara magnética mide la tensión de Hall en todas las áreas de la banda de rodadura. Debido a la existencia de grietas, la alteración de la tensión entre los sensores ($\partial V_H / \partial x$) se grafica para lograr directamente la información de la grieta. La selección de una frecuencia de corte adecuada es necesaria para encontrar una relación señal / ruido óptima y la resolución de la señal. Los autores realizaron una prueba de laboratorio para evaluar esta técnica en la detección de fisuras superficiales; los resultados del tipo diferencial de cámara magnética se muestran en la Figura 66.

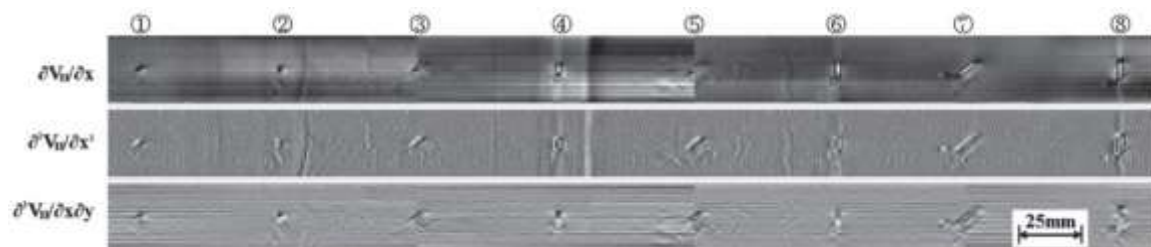


Figura 66: Ocho grietas superficiales en una muestra de rueda y los resultados de la cámara magnética de tipo diferencial.

4.1.5. Análisis de ruido Barkhausen

Este método sirve para conocer el estado de tensiones en las ruedas. Se basa en el movimiento de los bordes de dominios microscópicos magnéticos que ocurren en los materiales ferromagnéticos bajo la influencia de un campo magnético externo. Estos movimientos no uniformes se reflejan en el lazo de histéresis de magnetización como pequeños y discontinuos incrementos en la curva conocida como ruido Barkhausen. Además está fuertemente influenciada por el estado de tensiones del material. En el caso del acero, la intensidad del ruido se incrementa bajo la aplicación de tensiones de tracción y decrece al aplicar tensiones de compresión, [42, 43].

4.1.6 Ultrasonido

El método de ultrasonidos ha sido ampliamente estudiado y cuenta con una vasta aplicación en el campo ferroviario para el control de ruedas. Se trata de la técnica más usada, ya que, utilizando palpadores y parámetros adecuados, se puede llegar a inspeccionar tanto la banda de rodadura, como la llanta y hasta el velo y el cubo. Se suelen emplear ondas transversales emitidas diagonalmente desde la banda de rodadura,

usando la técnica de pulso-eco. También es posible usar ondas superficiales, si bien no sería posible conocer la profundidad de las grietas. En el final de este documento se deja disponible el ANEXO, en este se encontraran algunas características de su modo de funcionamiento, las distintas técnicas empleadas y las variantes tecnológicas con las que se puede aplicar el método.

Como hemos visto antes, la rueda tiene una geometría variada y la factibilidad de su inspección en sus distintas zonas dependerá de la adaptación del método a la compleja geometría. En esta sección se presentan algunas aplicaciones del método en taller.

Una aplicación de este ensayo que se presenta en [44], donde se aplica la técnica de inspección ultrasónica para fisuras de la rueda debajo de la superficie sin desmontar las ruedas. Para este fin, diseñaron un soporte de múltiples sondas, con 14 sondas de onda de corte y 3 sondas de haz recto, como se muestra en la Figura 67. La intensidad de las ondas de corte y el ángulo de incidencia dependen de las geometrías complejas de la rueda para detectar defectos orientados tangencialmente y defectos radiales, en diferentes zonas del disco de la rueda. Este método requiere dos giros de la rueda para su evaluación. La primera rotación de la rueda es para humedecer la banda de rodadura y la siguiente para la inspección ultrasónica.

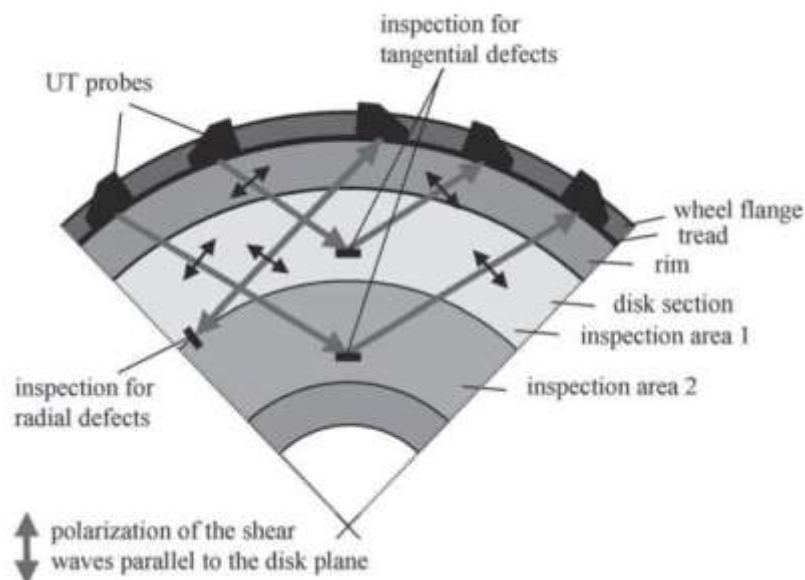


Figura 67: Vista esquemática de la disposición de la sonda de onda de corte, [44].

Otro ejemplo encontramos en [45], en donde se explora la posibilidad de aplicar ondas ultrasónicas para diagnosticar fallas en la interfaz de contacto rueda-riel. Las condiciones de contacto se evalúan analizando la amplitud adquirida de la onda reflejada por la interfaz de contacto. Esto se basa en el hecho de que el coeficiente de reflexión en la condición real depende parcialmente de la fuerza ejercida. En pruebas de laboratorio, algunos defectos artificiales fueron creados en dos tipos de rieles y tres tipos de ruedas. Las muestras de ruedas y rieles fueron cargadas hasta 10 kN. La sonda ultrasónica se sumergió en agua a la distancia adecuada para simplemente enfocarse en la región de contacto. Los resultados de estas investigaciones experimentales de laboratorio demostraron que la técnica ultrasónica se podría utilizar para evaluar las irregularidades de los contactos de las ruedas. Además, esto proporciona evidencia suficiente sobre ciertos parámetros de contacto importantes como el tamaño, la forma del área de contacto nominal, el área de contacto real y la presión de contacto. Estas pruebas se realizaron en el laboratorio y en condiciones estacionarias. La disposición

del riel, la rueda y la sonda ultrasónica se muestra en la Figura 68 y los mapas de contacto rueda-riel, para diferentes exámenes se muestran en la Figura 69. En esta misma línea, Pau et al. en [46] desarrollaron su método de procesamiento para investigar anomalías de la interfase y fisuras de la superficie.

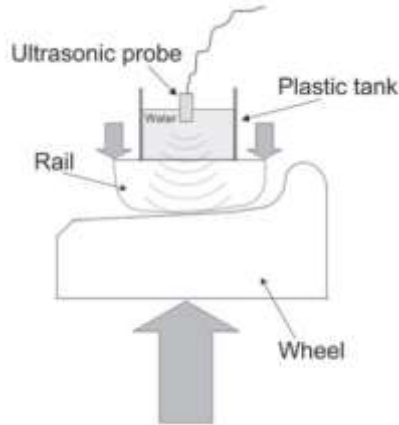


Figura 68: Esquema de componentes para análisis ultrasónico del contacto entre rueda y riel, [45].

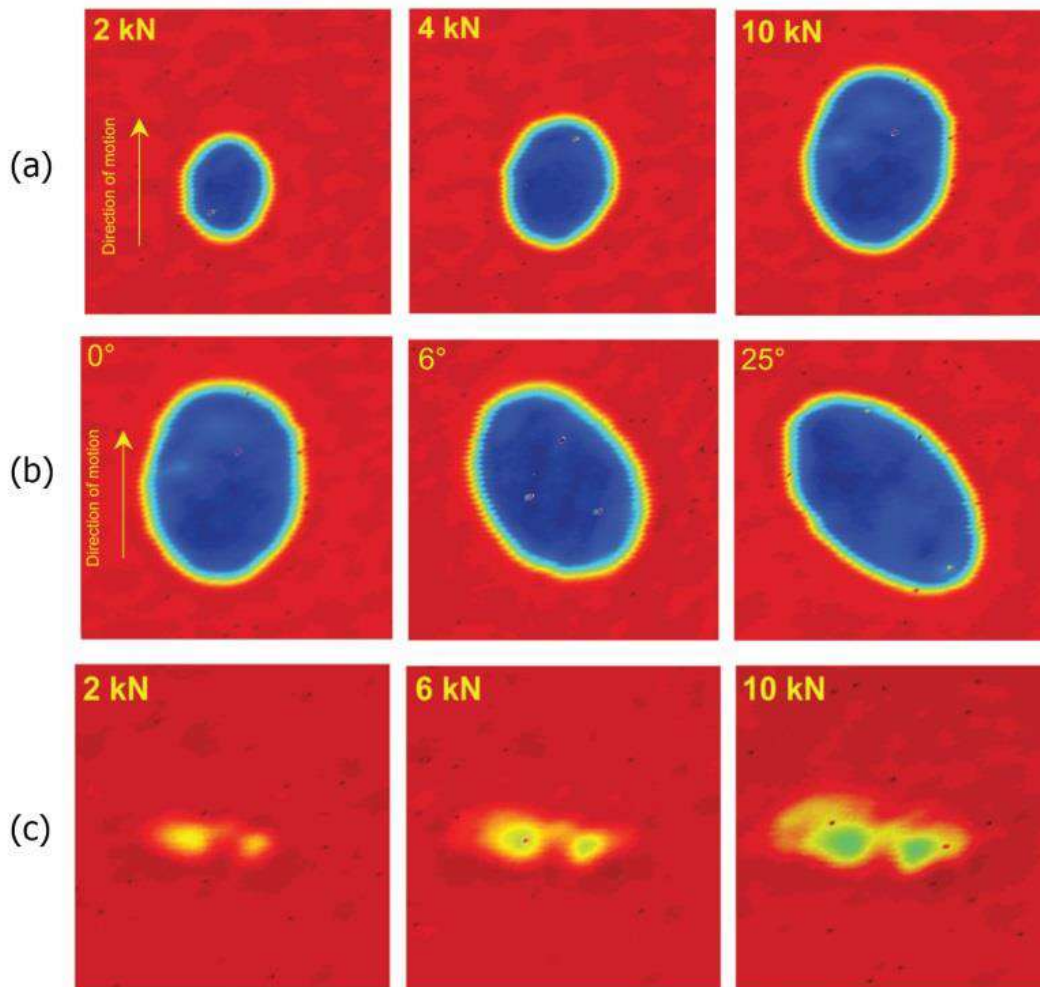


Figura 69: (a) contacto normal rueda-riel; su evolución al aumentar la carga: (b) contacto desalineado rueda-riel, (c) contacto irregular por rueda defectuosa, [45].

4.1.7. Termografía

El uso de una cámara infrarroja para detectar grietas en una rueda de ferrocarril se basa en la diferencia en las conductividades térmicas del acero y la capa de aire en la grieta. Cualquier resistencia térmica de las grietas al flujo de calor conduce a cambios rápidos en la temperatura del área de la grieta. Dos ejemplos de desarrollos son [47] y [48]; en [47] se registró la alteración de la extensión de temperatura en la superficie del disco de la rueda mediante una cámara infrarroja. Pese a los valiosos resultados que se obtienen en la evaluación de las ruedas para identificar fisuras en la superficie, este método solo se puede realizar en talleres, debido a que es un método activo que requiere calentamiento. Además, las fisuras son detectables aproximadamente 3 minutos después de comenzar el proceso de calentamiento. Por lo tanto, no es adecuado para la implementación en servicio.



Figura 70: Prueba de defectos superficiales en ruedas de ferrocarril por termografía de inducción utilizando un robot, [48].

4.2 Inspecciones en servicio

Diferentes enfoques del monitoreo del estado de las ruedas consisten en instalar sensores en la rueda, en el vehículo o al costado de la vía. Estas técnicas generalmente requieren equipo específico para montar los sensores, y pueden emplear distintas tecnologías como se verá a continuación.

4.2.1. Detección de defectos por medición de cargas e impactos

Es una técnica muy extendida, que se basa en medir sobre un riel instrumentado los impactos de carga generados por la rueda a su paso. Se trata de monitorear el impacto provocado por las vibraciones al paso de las diferentes ruedas. Se caracteriza por evaluar los efectos causados por las irregularidades (fuerzas de impacto), cualesquiera sea su naturaleza. Por consiguiente, no son adecuadas para medir la extensión de los defectos (por ejemplo, longitud de los planos o pérdidas de material) y, frecuentemente, las medidas son dependientes de la velocidad del tren. Los sensores más utilizados son galgas extensométricas (cargas) y los acelerómetros (impactos), aunque hoy en día hay nuevas tecnologías como la fibra óptica.

A. Sistemas basados en galgas extensométricas

Las galgas extensométricas son dispositivos cuya resistencia eléctrica varía, de forma conocida, al ser sometidos a deformaciones y suelen fabricarse en forma de films. Para su aplicación en el sector ferroviario, normalmente se adhieren a un riel de medida, estimando la fuerza de compresión de la rueda a partir de la deformación elástica del riel. Usualmente se conectan en configuración de puente de Wheatstone. El desequilibrio del puente se mide mediante amplificadores diferenciales que, además, reducen la incidencia del ruido.

Uno de los sistemas más conocidos para medir la carga de las ruedas de tren, basado en galgas extensométricas, es WILD (Wheel Impact Load Detector, ver Figura 71), utilizado en el Reino Unido a partir de 1985, [49]. En este caso los extensómetros se montan directamente en el alma del riel en forma de puente resistivo ocupando unos 30 cm entre las cuatro ramas; así se logra medir la fuerza en sentido vertical y lateral. Un riel instrumentado consta de hasta 128 sensores y la carga estática del vehículo se sustrae de la medida realizada; pero no puede cancelarse el efecto de la velocidad del tren, [50]. Cuando se supera un umbral determinado, se alza una alarma para verificar el defecto por otros medios. Toda la información recogida por el sistema se almacena en una base de datos, para analizar la evolución de los posibles defectos en cada rueda y cada vehículo, [51, 52].



Figura 71: Detector de impacto de carga WILD, [49].

B. Sistemas basados en acelerómetros

Los acelerómetros son transductores cuya salida es proporcional a la aceleración de una masa constante con o sin amortiguamiento que forma parte del sensor. Existen múltiples tecnologías para realizar estos dispositivos, básicamente dedicadas a medir el desplazamiento de la masa con distintos métodos (capacitivos, magnéticos, piezoeléctricos, ópticos, etc.).

Para medir continuamente el estado de la banda de rodadura y, particularmente, la formación de aplanamientos en las ruedas, se ha propuesto integrar acelerómetros en los rodamientos de las ruedas, midiendo la aceleración vertical, [53]. Al integrarse en un vehículo específico, su diseño se particulariza para los parámetros que intervienen en el comportamiento dinámico, mejorando su capacidad de discriminación entre rueda sana y con defectos.

Pero, en general, los acelerómetros se montan sobre los rieles, de forma análoga a como se hace con las galgas extensométricas. En este caso, resulta más complicado interpretar la aceleración medida como causa de un defecto en la banda de rodadura, ya que el paso de cada rueda produce una cierta aceleración y la medida depende

estrechamente de la velocidad y carga del tren. En conjunto, cualquier sistema de detección de defectos en la banda de rodadura basado en acelerómetros, requiere el empleo de técnicas de procesamiento digital sobre los registros proporcionados por los sensores. Por otra parte, resulta difícil desacoplar los efectos de aceleración producidos por las ruedas montadas en el mismo bogie. Generalmente, los sistemas basados en acelerómetros detectan que existe un problema en alguna rueda del bogie, dejando para una posterior inspección (manual, por ejemplo), la localización y evaluación del defecto, a pesar de utilizar técnicas avanzadas de procesamiento digital de señal [54, 55].

Otro problema asociado es que los defectos superficiales pueden estar ubicados en cualquier posición de la circunferencia de la rueda, mientras que los sensores se sitúan en posiciones fijas y discretas. La sensibilidad para la detección decrece con la distancia a la que el defecto entra en contacto con el carril respecto a la posición del sensor. Por esta razón, se deben utilizar múltiples sensores para cubrir, al menos (sin redundancia) una longitud igual al desarrollo de la rueda (típicamente entre 2.2 y 3.2 m). Puesto que el empuje (distancia entre ruedas en un bogie, típicamente entre 1.5 y 2.8m) puede ser inferior a esta distancia, se mezclaran las indicaciones de las dos ruedas.

C. Sistemas que emplean luz

Una alternativa consiste en aprovechar la variación de la longitud de onda de la luz en fibras ópticas con su deformación (sensores FBG o *Fiber Bragg Grating*), [56]. Aunque la variable medida es la misma que en el caso de las galgas extensométricas (deformación de un riel elástico), las FBGs son inmunes al ruido de interferencia electromagnética (EMI), muy importante por las conmutaciones eléctricas en la catenaria y locomotora. Además, el uso de fibras ópticas puede servir para realizar múltiples medidas de forma distribuida, [57]. Un sistema de estas características ha sido instalado a lo largo de 36 km en Hong Kong en cinco estaciones de medida de cargas sobre el rail. La información se envía por fibra óptica a un computador central. Además, el sistema permite obtener información de temperatura y carga en los vehículos. En este sentido, constituye el primer intento de construcción de una red inteligente de sensores ferroviarios. En la Figura 72 se muestran algunas etapas de fijación de estos sensores sobre la vía, [59].

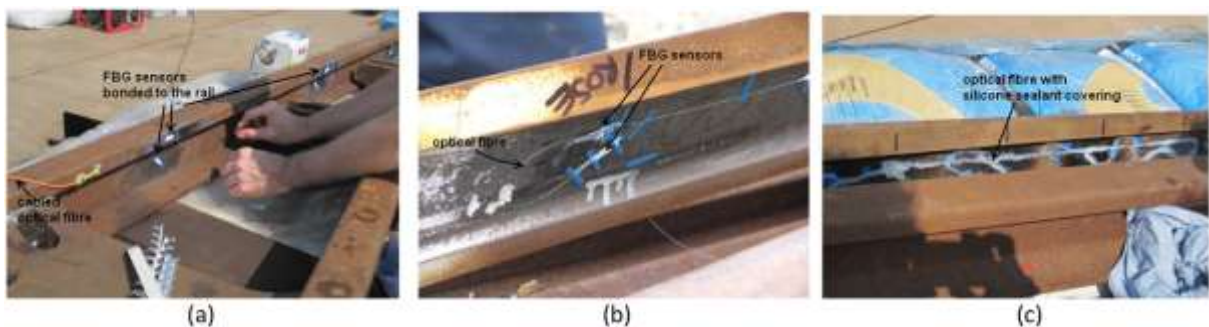


Figura 72: (a) Fijación de los sensores a las cuchillas de conmutación, (b) enrutamiento de la fibra y fijación de los sensores y (c) protección de los sensores con sellador de silicona, [58].

4.2.2. Ultrasonidos

A. Defectos en la superficie de rodadura

La capacidad de las ondas superficiales de Rayleigh (ver ANEXO) para detectar defectos en la banda de rodadura de modelos de ruedas de tren a 1/4 de escala se observa por primera vez en 1973, [59]. Observaron que la onda de Rayleigh podía ser detectada tras dar 4-10 vueltas a la circunferencia, lo que facilitaría la detección midiendo el cambio de atenuación de la onda en cada vuelta a la rueda. Sin embargo, esta técnica sólo es práctica con ruedas nuevas, resultando difícil establecer patrones de atenuación en ruedas desgastadas y con pequeños defectos superficiales debidos a la fatiga de rodadura.

Este principio ha sido utilizado para la detección de defectos superficiales mediante transductores ultrasónicos montados en un riel bajo la superficie de rodadura con el tren en marcha. Los transductores pueden ser de distinto tipo (piezoeléctricos, EMAT o láser); pero en todos los casos generan ondas de Rayleigh que viajan por la periferia de la rueda (banda de rodadura y pestaña).

Una propuesta utiliza dos transductores piezoeléctricos en transmisión, orientados para generar y recibir ondas de Rayleigh, [60]. Para cada rueda se disponen dos sistemas de medida ligeramente separados, en los que las señales se hacen circular en direcciones opuestas, de forma que puedan analizarse las indicaciones en cada vuelta del pulso ultrasónico por la periferia de la rueda. Midiendo los tiempos de vuelo por la banda de rodadura y por la pestaña (desde la emisión a la recepción de la primera y segunda indicación, respectivamente), es posible determinar el diámetro y el grado de desgaste de la rueda. La Figura 73 muestra el arreglo de aplicación.



Figura 73: (a) Instalación del sistema para la detección de defectos superficiales en la banda de rodadura. (b) Transductor piezoeléctrico utilizado por el sistema para generar y recibir ondas superficiales.

B. Defectos en el volumen de la rueda

Con frecuencia la inspección se realiza con ruedas desmontadas, generalmente en inmersión. Para ello, se disponen uno o más transductores mono-elemento que introducen el sonido en la rueda a través de la banda de rodadura, principalmente para detectar defectos en sentido tangencial, [61]. La rueda se hace girar mientras que los transductores se desplazan en dirección axial, facilitando la inspección del volumen de la llanta y velo. Esta técnica se utiliza, por ejemplo, en la estación desarrollada por

Railway Technology para inspeccionar ruedas montadas en el bogie (Figura 74), con los transductores operando en pulso-eco, [62].

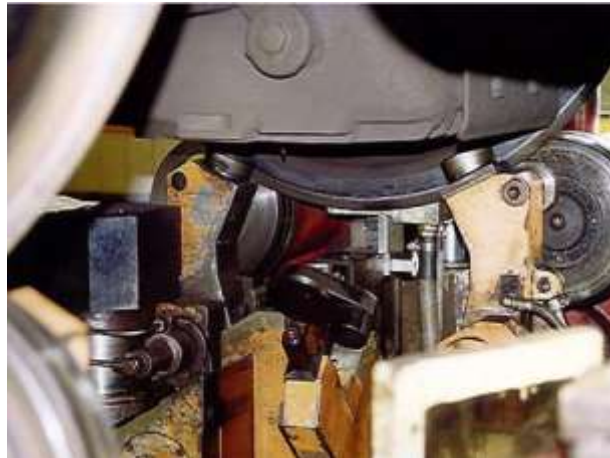


Figura 74: Sistema de inspección de ruedas por US con plataforma mecánica, [62].

4.2.3. Métodos ópticos

La disponibilidad de tecnología láser, detectores lineales y matriciales y cámaras de alta velocidad, han permitido desarrollar sistemas de visión artificial para localizar ciertos defectos en las ruedas de trenes de forma dinámica y automática. Desde el punto de vista del desgaste, los parámetros esenciales en el perfil de la rueda, que además son críticos, son: la altura y anchura de la pestaña y el espesor de la llanta. Los sistemas ópticos se dirigen especialmente a medir estos parámetros y, simultáneamente, a determinar el desgaste no uniforme de la banda de rodadura.

Como primera realización, se utilizan punteros láser a ambos lados del contacto rueda-riel para producir puntos brillantes sobre la superficie de rodadura a una cierta altura. Con cámaras se obtienen las correspondientes imágenes, que definen una cuerda en la circunferencia, cuyo diámetro puede obtenerse por simple geometría, [63].

Una alternativa utiliza medidores láser de distancia, que pueden ubicarse a decenas de cm del objeto a medir (rueda). Estos dispositivos están formados por un emisor láser puntual y un receptor situado lateralmente, a una distancia conocida. El desplazamiento de la imagen del punto reflejado en un detector óptico lineal proporciona una medida precisa de distancia por triangulación. La combinación de varios medidores de distancia facilita la obtención del diámetro de la rueda, pestaña y llanta y, por consiguiente, una medida del nivel de desgaste de la rueda, [64]. La técnica fue, posteriormente, mejorada con la incorporación de cámaras CCD y técnicas de procesamiento de imagen, [65].

Uno de los métodos ópticos que más se ajusta para el control de los parámetros geométricos en las ruedas es el escaneo láser con luz estructurada. El sistema emplea un láser con una lente de Powell para generar una línea láser, esto es en realidad un plano láser y se conoce como luz estructurada. Por otro lado la línea al intersecar la superficie del objeto dibuja sobre esta el perfil en un determinado plano. Luego la cámara captura el perfil dibujado y se utilizan algoritmos para extraer dicha línea. En el caso de la rueda, debido a su perfil compuesto por el flanco interno, la pestaña, banda de rodadura y el flanco externo, es conveniente hacer uso de dos cámaras y dos láseres para obtener la geometría total de este. Al rotar la rueda sobre su eje, es posible obtener el perfil completo en sus 360°, [66], ver Figura 75.

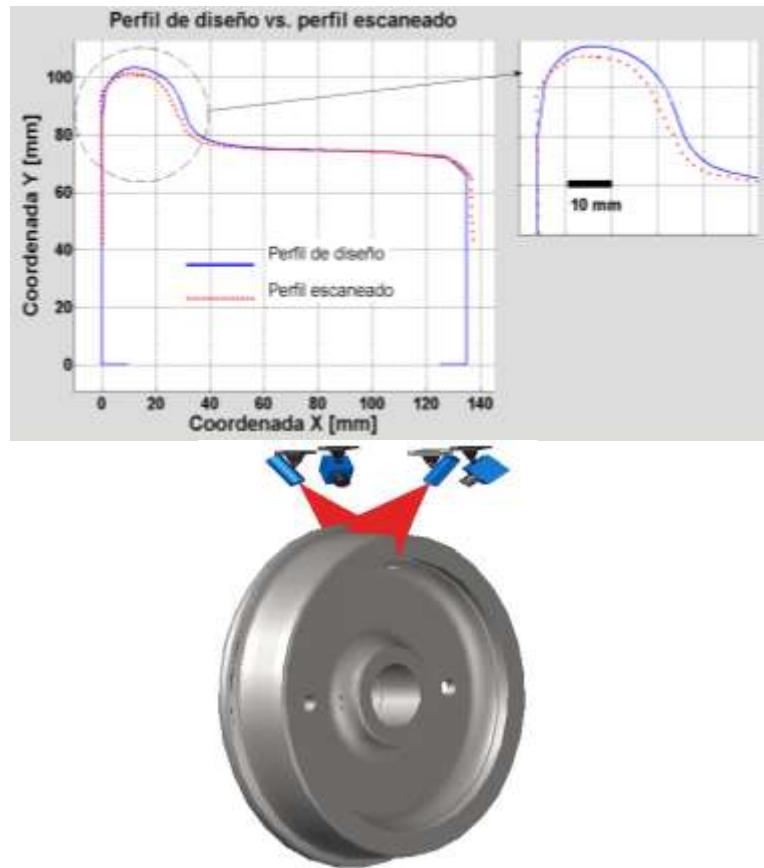


Figura 75: Perfil escaneado de rueda para control geométrico de la banda de rodadura por métodos ópticos, [66]

5. Defectos en ejes ferroviarios [67]

De los diversos materiales rodantes en uso en el sector, son los ejes ferroviarios los componentes más altamente sometidos a esfuerzos. La seguridad y la fiabilidad de estos ejes son, por lo tanto, de primordial importancia. La siguiente discusión es sobre defectos, que se observan en ellos.

A. Fabricación del acero

Los aceros que se requieren para la fabricación de ejes se pueden fabricar en hornos de hogar abierto, procesos básicos de oxígeno o una combinación de estos procesos. Se requiere que el acero fabricado sea de calidad *calmado o reposado*¹ para tener la máxima resistencia a la fatiga en condiciones de carga dinámica. El acero debe tener un máximo de 0,007 % de nitrógeno y 2 ppm de hidrógeno, si es producido por procesos básicos de oxígeno. Estos dos elementos tienen la tendencia a desarrollar grietas/fragilidad durante posteriores operaciones de fabricación o servicio. Con el fin de obtener las propiedades mecánicas deseadas el contenido de azufre y fósforo no debe exceder el 0.05%. El acero así producido tiene la forma de lingotes que luego se trabajan para obtener el producto final. Con el fin de garantizar un componente libre de burbujas indeseables y segregación perjudicial, es necesario descartar lo suficiente del lingote.

B. Forja del eje

Los lingotes así producidos se convierten en forma de tochos al pasar por un tren de laminación de desbaste y la forma final del eje forjado se obtiene forjando el tocho en una prensa o un martillo de forja. La relación de reducción de lingote a eje no debe ser generalmente inferior a 4: 1. Los ejes forjados se dejan enfriar lentamente después de la forja. Posteriormente las piezas en bruto forjadas se tratan térmicamente de forma adecuada (normalizadas o enfriadas y templadas) para obtener la microestructura y las propiedades mecánicas deseadas. Durante el proceso de fabricación del acero y también durante las posteriores operaciones de trabajo mecánico para producir la forma final del eje, es esencial garantizar la ausencia de defectos, como por ejemplo, burbujas, segregaciones, grietas, escamas, solapas, costuras, etc. Estos defectos no son deseables ya que su presencia conduce a la falla de los ejes en servicio. El control suficiente del proceso de tratamiento térmico es esencial para obtener las propiedades mecánicas deseadas y evitar microestructuras no deseadas (por ejemplo, estructuras sobrecalentadas o quemadas).

C. Mecanizado

Los bloques forjados y tratados térmicamente se mecanizan posteriormente a las dimensiones de diseño. Es esencial el máximo cuidado para mantener el acabado superficial especificado, especialmente en los muñones (zonas del par de fricción) y las zonas de los asientos de las ruedas, ver Figura 76. El radio de redondeo en cada cambio

¹ El acero calmado o reposado (proveniente del inglés *killed*) es acero que se ha desoxidado por completo mediante la adición de un agente antes de la fundición, de modo que prácticamente no hay evolución de gas durante la solidificación. Se caracteriza por un alto grado de homogeneidad química y ausencia de porosidades de gas. Se dice que el acero se "mata" porque se solidificará silenciosamente en el molde, sin que salga gas. Se emplea una "K" para fines de identificación, [68].

de sección debe ser una transición gradual y de dimensión correcta. No son deseables cambios bruscos en la sección, marcas de herramientas, marcas de abolladuras, marcas de mecanizado, etc. en la superficie del eje. Las propiedades de fatiga en los ejes son altamente sensibles a las imperfecciones de la superficie. Por lo tanto, es lógico que el correcto manejo de los ejes mecanizados también garantice el debido cuidado para evitar daños en la superficie.



Figura 76: Esquema de eje ferroviario con las zonas de asiento y muñón, [69].

D. Defectos observados y su origen

Por todo lo descrito anteriormente, los defectos que surgen en el eje se deben principalmente a defectos durante la fabricación en sí del acero, durante los posteriores procesos de fabricación y también debido a una variedad de condiciones de servicio a las que están sujetos. Las causas de varios defectos son: **a)** operaciones de fabricación y conformación de acero; **b)** operaciones de mecanizado; **c)** operaciones de tratamientos térmicos; **d)** operaciones de ensamblaje; **e)** prácticas de reparación; **f)** prácticas de mantenimiento y **g)** corrosión.

Los principales defectos encontrados durante la fabricación del acero y las operaciones posteriores de conformado son: porosidades, segregación, inclusiones de escoria, grietas, solapas, costuras, etc.

Los principales defectos en las operaciones de tratamientos térmicos son: microestructura no uniforme, sobrecalentamientos o quemaduras, descarburación, defectos de superficie, etc.

Si el proceso de mecanizado no se realiza correctamente puede provocar: marcas de torneado rugosas, marcas de herramientas, radios de filete insuficientes, etc.

Los métodos de montaje inadecuados; el uso de llama de oxiacetileno/tratamiento incorrectos; presión de prensado insuficiente, todos tienen efectos perjudiciales sobre la vida útil del eje.

Se requiere que las cajas del eje se mantengan adecuadamente con respecto a la lubricación, el par de apriete y la entrada de materias extrañas. Las áreas expuestas a la atmósfera son propensas a la corrosión y los hoyos de corrosión formados funcionan como áreas de concentración de tensión.

Se ha encontrado que las ubicaciones más vulnerables de fractura en los ejes son **el asiento interior de la rueda, los muñones y las zonas de transición o filetes.**

Las causas de la falla del asiento interior de la rueda se han atribuido a cubos de bordes afilados, cubos más cortos que los asientos de las ruedas, corrosión por fricción y marcas de mecanizado que dan lugar al inicio de grietas y finalmente a la fractura.

Se ha encontrado que las roturas de los muñones son causadas por muescas producidas por los bordes internos de la pista, el calentamiento local y discrepancias en el proceso de prensado durante el montaje.

Las fallas en el área del filete son atribuibles a radios de filete insuficientes, marcas de herramientas, etc.

En las Figuras 77 y 78 se muestran algunos defectos que provienen del proceso de fabricación del acero, [70].



Figura 77: Fisura radial en el centro del eje, [70].



Figura 78: Defecto volumétrico y fisuras radiales, [70].

En las Figuras 79 a 81 se muestran algunos ejemplos de daños durante el servicio en ejes ferroviarios y el tipo de falla.



Figura 79: Superficie de fractura por fatiga, alargada con varias zonas de fatiga, [67].



Figura 80: Superficie de fractura abollada, [67].



Figura 81: Fractura frágil, [67].

6. Ensayos no destructivos aplicados a ejes

Como para todas las aplicaciones de END, los métodos y técnicas a aplicar se seleccionan según el tipo de defectos (superficiales, sub-superficiales y volumétricos) y la geometría del componente. En la inspección de ejes ferroviarios se destacan los métodos de partículas magnéticas y de ultrasonidos.

6.1 Partículas Magnéticas

En las Figura 82a y 82b se muestra la detección de grietas en la superficie empleando este método. En el caso de esas figuras, para que la evaluación de defectos o grietas sea más fácil y más confiable, se emplea partículas magnéticas fluorescentes y luz UV para la iluminación de la superficie. En esos ensayos se detecta de manera eficiente grietas en los ejes con indicaciones tanto en dirección transversal como longitudinal del eje del carro. La magnetización de los ejes en cuestión se puede realizar con dispositivos móviles o estacionarios, [67].

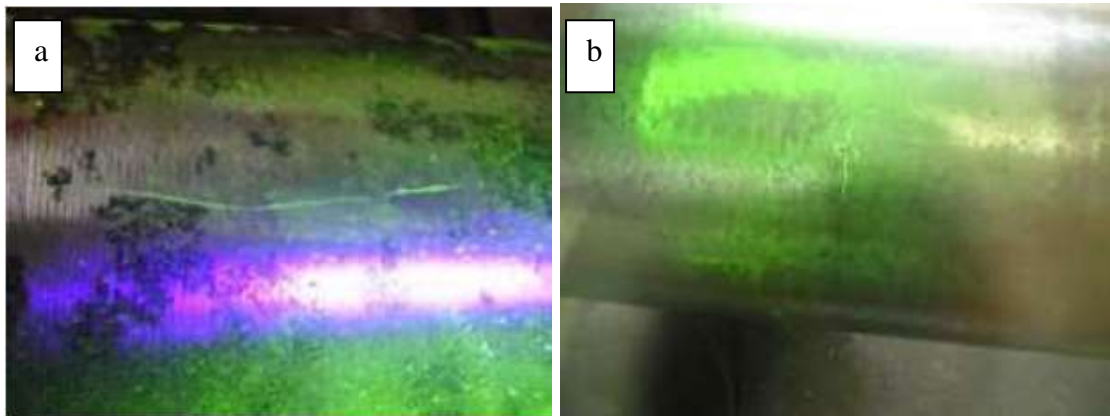


Figura 82: Detección mediante partículas magnetizables fluorescentes: a) fisura longitudinal, b) fisura transversal, [67].

6.2 Ensayos ultrasónicos

Las técnicas convencionales de ultrasonido manual requieren el empleo de varios transductores para evaluar la totalidad del componente. En la Figura 83 se muestra el uso de transductores a 0° , 37° y 60° con los cuales se puede llegar a evaluar la zona de los asientos de ruedas y los cambios de sección, [70]. Esto conlleva a una situación problemática ya que la evaluación queda sujeta a la experticia del evaluador, sumado a los largos tiempos de ensayo y registro de datos, considerando la totalidad de ejes a evaluar en un tren.

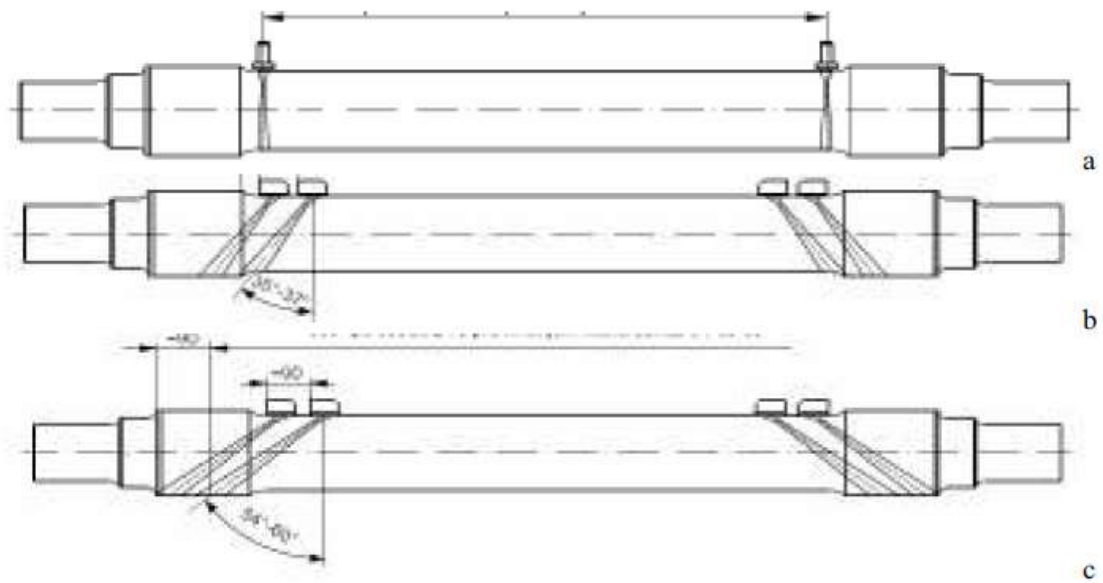


Figura 83: Ensayo ultrasónico con transductor a) normal, b) 37° y c) 60°, [70].

Una solución ante este problema se presenta en [71], en donde el transductor empleado cuenta con la tecnología de matriz en fases (phased array) para realizar barridos sectoriales y generar imágenes de corte transversal de la sección evaluada, como se muestra en la Figura 84. Esta metodología se puede utilizar tanto desde los extremos del eje como sobre su superficie cilíndrica y evaluar en menor tiempo el eje completo.

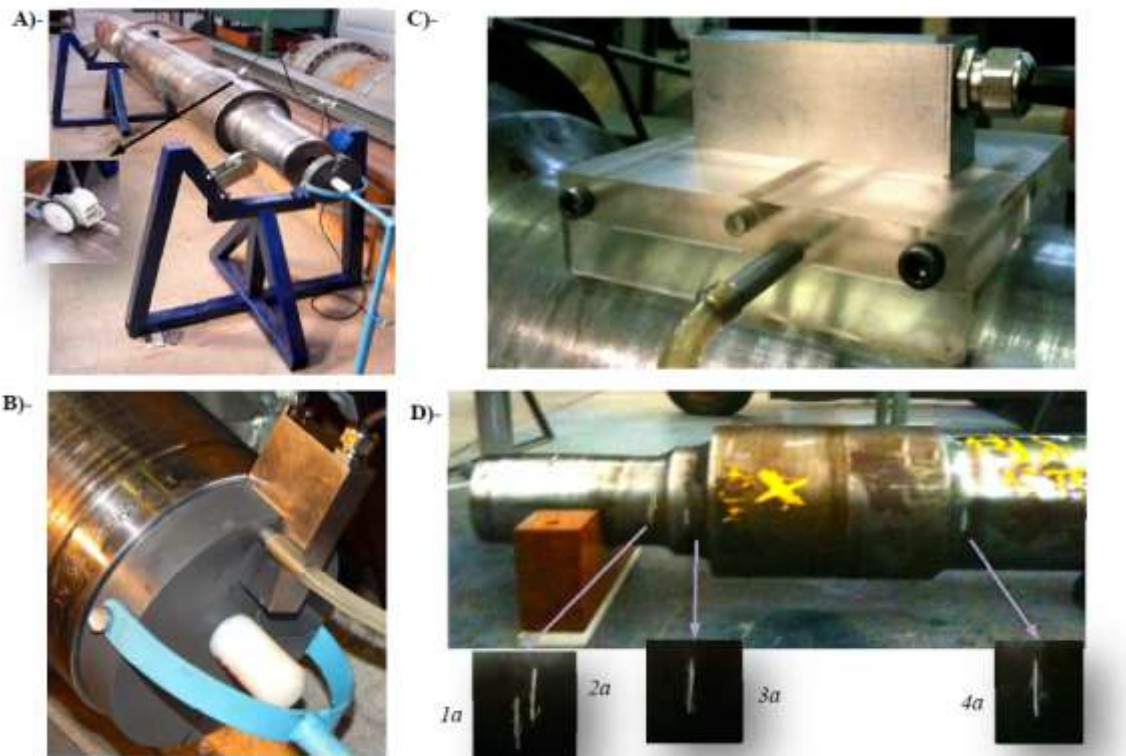


Figura 84: A) Bancada de ensayo. B) Soporte para posicionar el array en el extremo del eje. C) Soporte para posicionar sobre el lateral del eje. D) Entallas en distintas posiciones.

En las figuras Figuras 85 A)-B) y 86 A)-B)-C) se muestra un barrido sectorial de los haces ultrasónicos, es decir un corte a una cierta posición angular con respecto a los 360° del eje. Mientras que en las Figuras 85 C) y 86 C) se muestra un mapeo que nos da un mapeo de todos los defectos en función del giro del eje. Este mapeo facilita la lectura de la inspección, pudiéndose determinar sobre la imagen la extensión y orientación de los defectos.

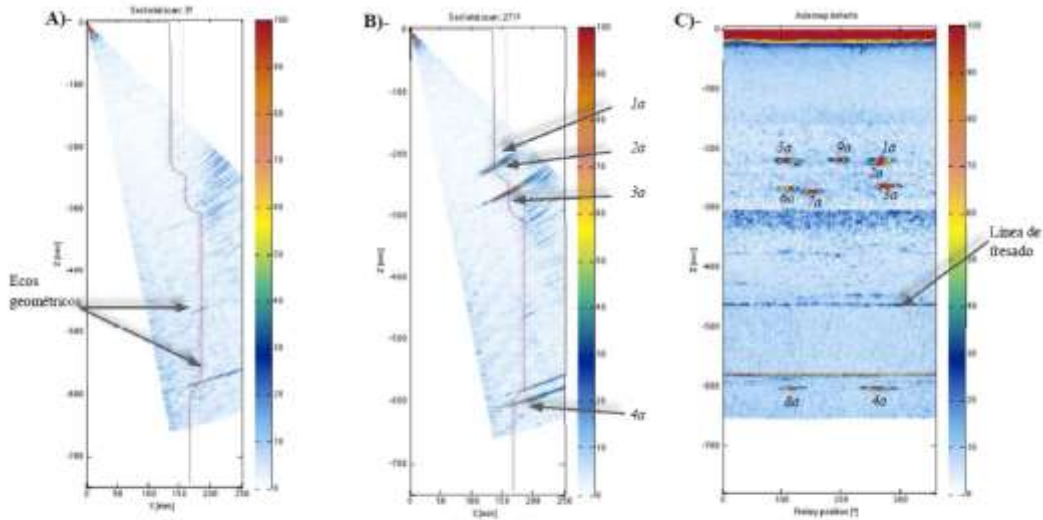


Fig. 4. A)- S-Scan desde el extremo superpuesto con la máscara del eje en una región libre de fallas. B)- S-Scan en una zona con defectos, claramente se identifican las 4 ranuras de la Fig 2D. C)- Mapeo de defectos en función de la profundidad y del giro del eje.

Figura 85: A) S-Scan desde el extremo en una región libre de fallas. B) Indicaciones de tipo ranuras. C) Mapeo de los defectos en función de la profundidad y del giro del eje.

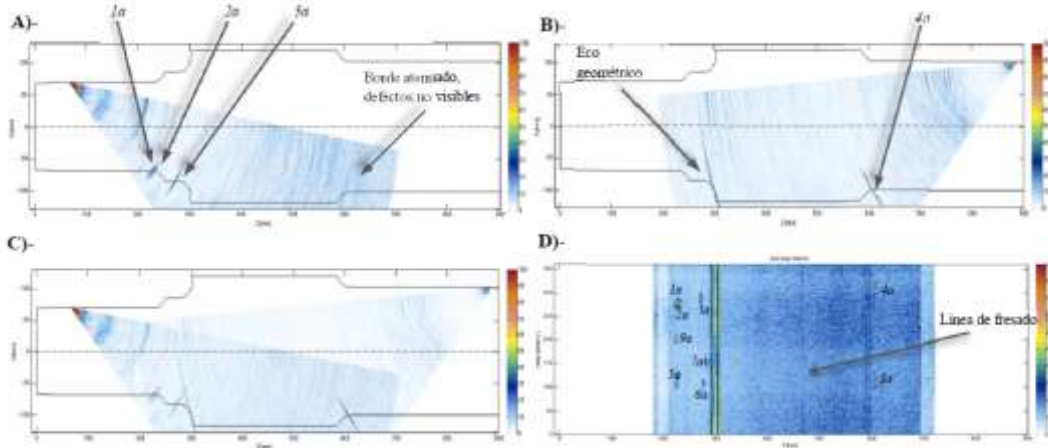


Fig. 5. A)- Barrido S-Scan desde un lateral cercano al extremo A. B)- Barrido efectuado por detrás del asiento de la rueda. C)- Composición espacial de las imágenes A y B. D)- A partir de las imágenes compuestas de forma coherente, se realiza el mapeo de defectos resultante de la inspección lateral.

Figura 86: A) S-Scan desde un lateral cercano a un extremo. B) Barrido por detrás del asiento de la ruedas. C) Composición de A y B). D) Mapeo de los defectos en función de la profundidad y del giro del eje.

ANEXO

Descripción general del método de ultrasonidos

Los ultrasonidos son ondas mecánicas de alta frecuencia (>20 KHz) que se propagan en medios materiales (cada medio tiene una velocidad de propagación relacionada con la densidad del medio). Se utilizan en END como señales exploratorias para detectar cambios de impedancia acústica en el medio en que se propagan, esos cambios de impedancia son producidos por discontinuidades: fisuras, poros, cambios de material, etc. Un cambio brusco de impedancia acústica (una grieta, por ejemplo), produce una señal de eco indicativa de la presencia del defecto. Según la técnica aplicada, el mismo transductor emite pulsos ultrasónicos y recibe los ecos generados (operación en pulso-eco); o, en otros casos, se utiliza un transductor emisor y otro receptor (en transmisión), detectando los defectos por cambios de intensidad en la señal recibida o por indicaciones de eco en el receptor (modo pitch-catch).

Los ultrasonidos de alta frecuencia (>200KHz) se atenúan rápidamente en medios gaseosos (aire) donde, además, existe una enorme desadaptación de impedancias entre el aire y sólidos (transductor y pieza), lo que conduce a grandes pérdidas de inserción (>100dB). Por esta razón, los transductores requieren un medio acoplante (agua, plástico, goma, etc.) para insonificar el material de interés (el acoplante se interpone entre el transductor y el material a inspeccionar). Alternativamente, se puede situar en contacto directo con la pieza a inspeccionar mediante una capa de adaptación de impedancias acústicas.

Los ultrasonidos se pueden generar con distintos tipos de transductores, entre ellos se pueden citar:

- Piezoeléctricos: Un material que presenta este efecto produce vibraciones mecánicas con una excitación eléctrica, y convierte vibraciones mecánicas en señales eléctricas. Normalmente se utilizan cerámicas de tipo PZT (titanato-circonato de plomo) por su mayor eficiencia pero existen otros compuestos sintéticos y naturales (cuarzo, por ejemplo). Actualmente buena parte de los transductores piezoeléctricos se realizan en composición con una matriz epoxi (piezocomposites) por su mayor eficiencia y ancho de banda. Su impedancia acústica es similar a la de otros sólidos por lo que puede obtenerse un buen acoplamiento directo transductor-pieza. En otros casos se utiliza acoplamiento de agua, suelas de plástico o goma. Esta tecnología es la de uso más frecuente en aplicaciones ferroviarias y en otros ámbitos.

- EMAT (Electro-magnetic acoustic transducer): Producen oscilaciones mecánicas por la fuerza de Lorentz que aparecen al hacer circular una corriente oscilante en un campo magnético. La corriente oscilante se induce en el material mediante una bobina. No requieren contacto ni acoplante, ya que generan el ultrasonido directamente en el material, que debe ser conductor. Asimismo permiten obtener distintos modos de propagación, aunque tienen una sensibilidad menor que los piezoeléctricos. Son utilizados con frecuencia en el ámbito ferroviario.

- LAHUT (Laser-air hybrid ultrasound transducer): En este caso se utiliza un láser de potencia pulsado, que, por efectos térmicos, genera ultrasonidos en el material impactado. En recepción se utiliza un láser de baja intensidad y un interferómetro. Es una tecnología costosa y de ajuste delicado, pero no requiere ningún medio acoplante.

Modos de propagación. En sólidos los ultrasonidos presentan diversos modos de propagación en función de la forma de vibración de las partículas del material. En sólidos infinitos solo pueden existir ondas longitudinales o transversales y los restantes

modos surgen como consecuencia de límites geométricos a la propagación (confinamiento):

- Ondas longitudinales (o de compresión): Las partículas vibran en la dirección de propagación y son las únicas que pueden formarse en medios líquidos y gaseosos.

- Ondas transversales (o de corte): Las partículas vibran en una dirección normal a la de propagación (shear waves).

- Ondas de Rayleigh: Son ondas superficiales que se producen en un material semi-infinito, con una penetración en el material del orden de una longitud de onda, donde las partículas vibran siguiendo trayectorias elípticas.

- Ondas de Lamb: Se producen cuando se introduce una segunda superficie límite (una placa, por ejemplo). Producen vibraciones simétricas o antisimétricas en placas con un espesor de varias longitudes de onda y las partículas vibran con una trayectoria elíptica.

Bibliografía

- [1] Zamora Abad Alfonso, “Estudio mecánico avanzado de un eje de ferrocarril” . Universidad Carlos III de Madrid, Leganés, España, Noviembre 2010.
- [2] García Antúnez Rubén, “Análisis de las variaciones modales de una rueda ferroviaria con grietas”. Universidad Carlos III de Madrid, Leganés, España, Octubre 2013.
- [3] El Rodaje en el ferrocarril – Ruedas. Tomo I. Julio Alvarez Rodríguez. Editorial: Juan de la Cuesta, 2010.
- [4] Okamoto Isao, “How Bogies Work”, Railway Technology Today 5, Edited by Kanji Wako, Japan Railway & Transport Review 18, December 1998.
- [5] ESPECIFICACION TECNICA FAT: V-701, Comisión Nacional de Regulación de Transporte, Septiembre, 1984.
- [6] ESPECIFICACION TECNICA FAT: MA-702, Comisión Nacional de Regulación de Transporte, Marzo, 1987.
- [7] Arturo Herreros Garrido, “Estudio de la defectología en ruedas ferroviarias”, Tesis de grado, Universidad Carlos III de Madrid, España, Abril 2010.
- [8] Roney, M.: ((State of the Art in Wheel/Rail Control – Highlights of the 1999 International Heavy Haul)). En: Proceedings of the AREMA 1999 Annual Conferences, AREMA – The American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association, Chigago, Illinois, 1999.
- [9] National Transportation Safety Board ,Washington, D.C. 20594, Railroad Accident Brief, Accident No.: DCA-07-MR-007, March 30, 2012.
- [10] Ha-Young Choi, Dong-Hyong Lee, Jongsoo Lee, “Optimization of a railway wheel profile to minimize flange wear and surface fatigue”, Wear, Volume 300, Issues 1–2, 2013, Pages 225-233.
- [11] D W Barke, W K Chiu, “A review of the effects of out-of-round wheels on track and vehicle components”. F03903 # IMechE 2005 Proc. IMechE Vol. 219 Part F: J. Rail and Rapid Transit, Melbourne, Australia, May, 2005.
- [12] Búsqueda en internet: Pérdida de redondez en ruedas de trenes, disponible en: <http://www.mermecgroup.com/inspect/train-monitoring/1024/wheel-impact-load.php>. Accedido en Diciembre de 2019.
- [13] Y.B. Huang, L.B. Shi, X.J. Zhao, Z.B. Cai, Q.Y. Liu, W.J. Wang, “On the formation and damage mechanism of rolling contact fatigue surface cracks of wheel/rail under the dry condition”, Wear, Volumes 400–401, 2018, Pages 62-73.

- [14] Farshid Sadeghi, Behrooz Jalalahmadi, Trevor S. Snack, Nihar Raje, Nagaraj K. Arakere, "A Review of Rolling Contact Fatigue", Journal of Tribology, Vol. 131, OCTOBER, 2009.
- [15] Anders Ekberg, Bengt Åkesson, Elena Kabo, "Wheel/rail rolling contact fatigue – Probe, predict, prevent", Wear, Volume 314, Issues 1–2, 2014, Pages 2-12.
- [16] Zhao, Xin & An, Boyang & Zhao, Xiaogang & Wen, Zefeng & Jin, Xuesong. "Local rolling contact fatigue and indentations on high-speed railway wheels: Observations and numerical simulations". International Journal of Fatigue. Volume 103, 2017, Pages 5 - 16.
- [17] He, Chenggang & Guo, J. & Liu, Q.Y. & Wang, Wen-jian. "Experimental investigation on the effect of operating speeds on wear and rolling contact fatigue damage of wheel materials". Wear. Volume 364, 2016, Pages 257-269.
- [18] Elena Kabo, "Image analysis of defects of railway wheels: a challenge for mathematicians", CHARMEC
- [19] Ekber Anders, Kabo Elena, "Classification of Wheel damage", Internal Report – Department of Applied Mechanics, Chalmers university of Technology, Report No, 2011:13
- [20] Zwierczyk, Péter Tamás, "Thermal and stress analysis of a railway wheel-rail rolling-sliding contact". Tesis doctoral, Budapest University of Technology and Economics Faculty of Mechanical Engineering, 2015
- [21] Bevan Adam, "Wheel damage research", University of Huddersfield Repository, Febrero, 2017.
- [22] WHEEL DEFECT MANUAL - ESR 0330, Reporte Interno, NSW Transport RailCorp, Version 1.2 Issued May 2013.
- [23] Railway occurrence report derailment, VIA RAIL CANADA INC, Transportation Safety Board of Canada, REPORT NUMBER R96T0095, 1996.
- [24] N. Kumagai, H. Ishikawa, K. Haga, T. Kigawa, K. Nagase. "Factors of wheel flats occurrence and preventive measures", Wear, 144, 277-287, 1991.
- [25] Seok-Jin Kwon, Jung-Won Seo, Hyun-Kyu Jun, Dong-Hyung Lee, "Damage evaluation regarding to contact zones of high-speed train wheel subjected to thermal fatigue", Engineering Failure Analysis, Volume 55, 2015, Pages 327-342.
- [26] Task Force Broken wheels –Proposal Short Term measures, Joint Network Secretariat Urgent Procedure, 28th July 2017.
- [27] Agencia reguladora del transporte ferroviario, Subsecretaría de transporte, Exporail, México, 2017.

- [28] Madrid Grande Rafael, “Estudio de la longitud crítica de fisura en rueda ferroviaria”, Tesis de grado, Universidad Carlos III de Madrid, España.
- [29] Derailment of empty coil train NB 901, ATSB Transport Safety Report Australian Transport Safety Bureau, Australia, April, 2018.
- [30] Sergey M. Zakharov, Irina G. Goryacheva, “Rolling contact fatigue defects in freight car wheels”, *Wear*, Volume 258, Issues 7–8, 2005, Pages 1142-1147.
- [31] T.A. Zucarelli, M.A. Vieira, L.A. Moreira Filho, D.A.P. Reis, L. Reis, “Failure analysis in railway wheels”, *Procedia Structural Integrity*, Volume 1, 2016, Pages 212-21.
- [32] Stefano Cantini, Steven Cervello, “The competitive role of wear and RCF: Full scale experimental assessment of artificial and natural defects in railway wheel treads”, *Wear*, Volumes 366–367, 2016, Pages 325-337.
- [33] Seok-Jin Kwon, Jung-Won Seo, Hyun-Kyu Jun, Dong-Hyung Lee, “Damage evaluation regarding to contact zones of high-speed train wheel subjected to thermal fatigue”, *Engineering Failure Analysis*, Volume 55, 2015, Pages 327-342.
- [34] Perfil Rodadura – Aparato para medir altura y ancho de pestañas, Normativa Comisión Nacional de Regulación de Transporte – Plano NEFA 913, Argentina.
- [35] Zapata Mejía Alejandro, “Mantenimiento de ruedas ferroviarias”, Universidad EAFIT, Medellín, Colombia, 2011.
- [36] ECS Esveld Consulting Services BV. (2011). @ ECS Esveld Consulting Services BV. Obtenido de @ ECS Esveld Consulting Services BV: <http://www.esveld.com/>
- [37] Stanislav Štarman, Vaclav Matz, “Automated system for magnetic particle inspection of railway wheels” 10th European Conference on Non-Destructive Testing, Moscow 2010, June 7-11 (ECNDT 2010).
- [38] Alireza Alemi, Francesco Corman, Gabriel Lodewijks, “Review on condition monitoring approaches for the detection of railway wheels defects”.
- [39] Búsqueda en internet: “Sistemas de inspección de ruedas”, disponible en: <https://www.intron.ru/en/development/sistema-vixretokovogo-kontrolya-kolesnyix-parvagonov.html>. Accedido en Diciembre de 2019.
- [40] Žurek ZH. Magnetic monitoring of the fatigue process of the rim material of railway wheel sets. *NDT E Int* 2006; 39: 675–679.
- [41] Hwang J, Lee J, Kwon S. The application of a differential-type Hall sensors array to the nondestructive testing of express train wheels. *NDT E Int* 2009; 42: 34–41.
- [42] Ivanova, Yonka & Partalin, Todor). “Non-Destructive Evaluation Of The Stress State In The Rim Of The Railway Wheels”, 2014.

- [43] M. Neslušán, P. Minárik, J. Grenčík, K. Trojan, K. Zgútová, “Non-destructive evaluation of the railway wheel surface damage after long-term operation via Barkhausen noise technique”, *Wear*, Volumes 420–421, 2019, Pages 195-206.
- [44] Pohl R, Erhard A, Montag H-J, et al. NDT techniques for railroad wheel and gauge corner inspection. *NDT E Int* 2004; 37: 89–94.
- [45] Pau M. Ultrasonic waves for effective assessment of wheel-rail contact anomalies. *Proc Inst Mech Eng Part F J Rail Rapid Transit* 2005; 219: 79–90.
- [46] Pau M, Leban B, Baldi A. Simultaneous subsurface defect detection and contact parameter assessment in a wheel–rail system. *Wear* 2008; 265: 1837–1847.
- [47] Verkhoglyad a. G, Kuropyatnik IN, Bazovkin VM, et al. Infrared diagnostics of cracks in railway carriage wheels. *Russ J Nondestruct Test* 2008; 44: 664–668.
- [48] U. Netzelmann U, G. Walle, A. Ehlen, et al. “NDT of railway components using induction thermography”, *Rev. Progr. Quant. NDE*, Minneapolis (2015, 34)
- [49] Salient Systems Inc.: ((Intelligent track solutions)). Disponible en: <http://www.salientsystems.com>.
- [50] Stratman, B.; Liu, Y. y Mahadevan, S. “Structural Health Monitoring of Railroad Wheels Using Wheel Impact Load Detectors”. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 2007, 7(3), pp. 218–225.
- [51] James, G. “*Analysis of Traffic Load Effects on Railway Bridges*”. Tesis doctoral, Royal Institute of Technology, 2003.
- [52] Brizuela, Jose David, “Detección de planos en ruedas de tren por análisis ultrasónico del contacto rueda-carril en condiciones dinámicas”, Tesis doctoral, Universidad Complutense de Madrid, España, 2010.
- [53] Uzzal, R. U. A.; Stiharu, I. y Ahmed,W. “Design and Analysis of MEMS based Accelerometer for Automatic Detection of Railway Wheel Flat”. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 2009, 53, pp. 947–955.
- [54] Belotti, V.; Crenna, F. y et. al. “Wavelet Signal Processing Applied to Railway Wheelflat Detection”. En: *Proceedings, XVII IMEKO World Congress: Metrology in the 3rd Millennium* pp. 1434–1437. IMEKO - International Measurement Confederation, Dubrovnik, Croacia, 2003.
- [55] Belotti, V.; Crenna, F. y et. al. “Wheel-flat diagnostic tool via wavelet transform)). *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2006, 20(8), pp. 1953–1966. ISSN 0888-3270.
- [56] Antunes, P.; Almeida, P.; Pinto, J. y Andr’e, P. “Fibre Bragg grating accelerometer for dynamic vibration measurement”. *PTEE*, Delft, Holanda, 2007.

[57] S J Buggy, S W James, S Staines, R Carroll, P Kitson, D Farrington, L Drewett, J Jaiswal, R P Tatam. “Railway track component condition monitoring using optical fibre Bragg grating sensors”. *Measurement Science and Technology*, Volume 27, Number 5, March, 2016.

[58] Tam, H. Y.; Lee, T.; Ho, S. L.; Haber, T.; Graver, T. y M´endez, A. “Utilization of Fiber Optic Bragg Grating Sensing Systems for Health Monitoring in Railway Applications)). pp. 1824–1832. IWSHM, Stanford, USA, 2007.

[59] Bray, D.; Dalvi, N y Finch, R. “Ultrasonic Flaw Detection in Model Railway Wheels”. *Ultrasonics*, 1973, 11(2), pp. 66–72.

[60] Corwan, J. V.; Corwan, G. G. y Corwan, J. G. “Method and apparatus for testing wear, size and residual stress conditions”, 1976. US Patent No. 3 978 712 (1976).

[61] Prorok, R.; Kuznieski, C. y Kucera, W. “Test apparatus for a railway Wheel”, 1999. US Patent No. 5 864 065 (1999).

[62] Railway Technology: “The web for the railway industry”. Disponible en: <http://www.railway-technology.com/contractors/training/ultrasonic>.

[63] Obrig, H.; Wittkopp, H. y Ewald, N. F. “Method and apparatus for determining the diameter of rail vehicle wheels”, 1989. US Patent No. 4 866 642 (1989).

[64] Danneskiold-Sams_e, U. “Apparatus for track-based detection of the wheel profile of passing railway wheels”, 1990. US Patent No. 4 932 784 (1990).

[65] Danneskiold-Sams_e, U.”Gramtorp, J. y Torben Madsen, A. H.: ((Plant for track-based detection of the wheel profile of train wheels)), 1993. US Patent No. 5 247 338 (1993).

[66] C. Rodrigo Romero Rosero, Guillermo Cosarinsky, M. Fernanda Ruiz Gale. “Structured light laser scanning. Application to the inspection of railway components”. *Comadem – International Journal of Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management*, Volume 11, Number 1, January 2008

[67] Lalit Kishor Mudgal, Rakesh Kumar Sharma, M.P. Singh, “Defects in Wheels and Axles and Detection by Ust”. *International Journal of Engineering and Management Research* Volume-4, Issue-2, April-2014, ISSN No.: 2250-0758, Page Number: 176-180.

[68] Búsqueda en Internet: Deoxidized steel. Disponible en: https://en.wikipedia.org/wiki/Deoxidized_steel. Accedido en Febrero de 2020.

[69] Búsqueda en Internet: esquema de eje ferroviario http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59442013000100006

[70] Jemec V´ictor, Jurman Joze, Grum Janez, “Evaluation of defects and cracks in carriage axles using non-destructive testing. NDT for Safety, November 07-09, 2007, Prague, Czech Republic.

[71] Brizuela J., Desimone, C. “Inspección de ejes ferroviarios con tecnología de Phased Array”. Revista ALAF – Asociación Latinoamericana de Ferrocarriles, N° 97, 2015.