



***Defectos en rieles y elementos para su
inspección no destructiva***

Ingeniería Ferroviaria

**Grupo Ensayos No Destructivos Aplicados a la Industria
Ferroviaria**

Facultad Regional Haedo

Universidad Tecnológica Nacional

<http://ndt.frh.utn.edu.ar/>

Dr. Javier Fava

Mag. Ing. Rodrigo Romero

2022

Contenido

Capítulo 1	4
Generalidades	4
1.1 Introducción	4
1.2 Características generales de los rieles	4
1.3 Partes del riel	5
1.4 Generalidades sobre ensayos no destructivos	7
Capítulo 2	10
Movimientos, cargas y esfuerzos soportados por el riel	10
2.1 Introducción	10
2.2 Movimientos anormales de los vehículos	11
2.3 Cargas en rieles	14
2.4 Esfuerzos en la vía férrea	17
2.5 Vida útil de los componentes ferroviarios – rieles	19
Capítulo 3	21
Conceptos generales de fractura en rieles	21
3.1 Identificación del desarrollo de los defectos	21
3.1.1 Tipos (o modos) de fractura	22
3.1.2 Fatiga	22
3.1.3 Tipos de crecimiento de defectos en los defectos transversales en rieles	23
3.1.4 Rupturas de múltiples etapas o fractura compuesta	25
Capítulo 4	27
Defectos en rieles	27
4.1 Fatiga de contacto por rodadura (FCR)	27
4.1.1 Head checks (HC)	32
4.1.2 Squats	34
4.1.3 Shelling (descascarillado o shells)	36
4.2 Quemaduras de ruedas (wheel or engine burns)	38
4.3 Defectos de fabricación, transporte, almacenamiento, montaje y mantenimiento	43
4.3.1 Defectos transversales	43
4.3.2 Decoloración	44

4.3.3 Defectos longitudinales.....	45
4.3.4 Fisuras en agujeros de pernos.....	51
4.4 Otros defectos.....	53
4.4.1 Fractura inversa.....	53
4.4.2 Ruptura de corte o cizallamiento.....	54
4.4.3 Separación de la cabeza y el alma.....	55
4.4.4 Separación de la cabeza y el alma en el extremo del riel.....	56
4.4.5 Defectos en el patín.....	58
4.4.5 Golpes o hendiduras en el riel.....	59
4.4.6 Astillas.....	60
4.4.7 Corrosión.....	60
4.4.8 Abolladura del riel (rail batter).....	61
4.4.9 Corrugaciones del riel.....	62
4.4.10 Defectos en soldaduras.....	65
4.4.10 Fractura asociada con conexión soldada de cable (para tracción o señalización).....	67
Bibliografía.....	70

Capítulo 1

Generalidades

1.1 Introducción

Según un relevamiento, [1], de la empresa Operadora Ferroviaria Sociedad del Estado (o SOF S.E., su nombre comercial es Trenes Argentinos Operaciones), durante el primer trimestre del 2014, el descarrilamiento fue la segunda causa de accidentes ferroviarios y durante todo el año 2015 este evento se presentó durante 67 ocasiones en la red de superficie. Esto se podría vincular a las condiciones de operación de **ejes, ruedas y rieles**. Por estas razones, es de crucial importancia para un adecuado funcionamiento de los trenes, el buen estado de estos componentes y el control periódico de los mismos, con el objetivo de evitar siniestros de gran impacto socioeconómico. Otra fuente que se recomienda consultar para estar informado del estado actualizado de los ferrocarriles argentinos son las estadísticas ferroviarias del transporte ferroviario, elaboradas por la Comisión Nacional de Regulación del Transporte, [2].

De esos tres componentes, se han seleccionado para este estudio los defectos que se producen sobre los rieles. Los principales componentes involucrados en las rodaduras de trenes son la **rueda** y el **riel**; como no pueden estudiarse de manera aislada, se hará un breve análisis de la interacción entre ambos, y de los esfuerzos que se generan exclusivamente en los rieles. El enfoque principal de este documento será la defectología asociada al riel y se mencionaran muy brevemente algunos de los métodos de ensayo no destructivo que se aplica en cada caso para su detección y evaluación. Como referencias principales se toman los documentos [3] y [4], asimismo se citan otros trabajos y publicaciones.

1.2 Características generales de los rieles

En el ferrocarril, el riel cumple simultáneamente las funciones de camino de rodadura, de elemento de guía y sostén de carga. Este elemento se encuentra sometido tanto a sollicitaciones estáticas como dinámicas.

Con la finalidad de que el riel soporte las cargas de servicio a lo largo de su vida útil, deben cumplir con las siguientes exigencias:

- Alta resistencia al desgaste
- Alta resistencia a la compresión
- Alta resistencia a la fatiga
- Alto límite elástico, una alta resistencia a la tracción y elevada dureza

- Alta resistencia a la rotura
- Buena soldabilidad
- Elevada homogeneidad del material en los componentes
- Buena calidad de la banda de rodadura

En función de lo expuesto el riel fue evolucionando en su forma y en su proceso metalúrgico de fabricación a lo largo de los años. Los rieles se fabrican de acero y en general la composición química de sus componentes es la siguiente:

Carbono – de 0,40 a 0,82 % - Con él aumenta la dureza y la resistencia al desgaste, pero también influye en la fragilidad. La gran mayoría son perlíticos.

Manganeso – de 0,60 a 1,70 % - Influye en la dureza, la resistencia al desgaste y a la tenacidad (no frágil), pero disminuye la soldabilidad.

Silicio – de 0,05 - 0,50 % - Aumenta la dureza, la resistencia al desgaste y facilita la laminación del riel.

Azufre y Fósforo – menos de 0,05 % - No son deseables debido a que fragilizan el acero, pero es muy costosa su eliminación.

Para mejorar ciertas características del riel se agregan otros aleantes como Ni, Cr, Mb, V y Al. Variando estos componentes y de acuerdo con el proceso de fabricación utilizado se consiguen distintas calidades de rieles.

1.3 Partes del riel

Actualmente el perfil de riel utilizado es el Vignole, que está constituido por tres partes principales, que son:

Hongo o cabeza, es la que se utiliza como superficie de rodamiento y está expuesta a las mayores sollicitaciones y sufre el desgaste. Debe tener un alto y ancho suficiente, dependiendo del calibre de cada riel.

Alma, es el elemento de espesor reducido que tiene la función de unir el hongo con el patín, asegurando la transmisión de las cargas desde el hongo al patín.

Patín, constituye la base del riel y es plana en la parte inferior, lo que permite su apoyo sobre los durmientes y debe tener un ancho suficiente, con el fin de distribuir la carga sobre los durmientes.

A continuación, se detalla específicamente otras regiones del riel. La Figura 1 muestra la terminología que se está describiendo.

Superficie de rodadura: Zona en la parte superior de la cabeza del riel, que se encuentra en contacto con la banda de rodadura de la rueda. En pendientes y en rieles de baja (velocidad) esta región puede variar desde 20 hasta 70 mm dependiendo del perfil de la rueda y del riel.

Región esquina de trocha: La esquina superior en el lado de trocha del riel, la cual hace contacto con la región de pestaña de la rueda. Dependiendo de la geometría riel-rueda, esta región puede variar entre 15 y 25 mm.

Esquina de trocha: Es el punto en la región de esquina de trocha, con una dirección de 45° respecto de la horizontal (con o sin peralte).

Región esquina de campo: La esquina superior del lado de campo del riel.

Zona de apoyo de eclisas: La región en el fondo de la cabeza del riel, la cual hace contacto con las eclisas. Las eclisas o bridas son los elementos empleados para la unión de rieles.

Empalme cabeza/alma: Región de empalme entre las secciones de la cabeza y el alma.

Eje neutro: Distancia vertical del riel en la cual el segundo momento de área de la sección superior es el mismo que el de sección inferior. Referido a la flexión, en este punto no hay tensión ni compresión.

Empalme alma/patín: Región de empalme entre las secciones del alma y el patín del riel.

Cima del patín: Región superior del patín, que se encuentra en contacto con las fijaciones.

Fondo del patín: Región inferior del patín del riel, que se encuentra en contacto con los durmientes o el balasto.

Pestaña del patín: Región del borde del patín del riel.

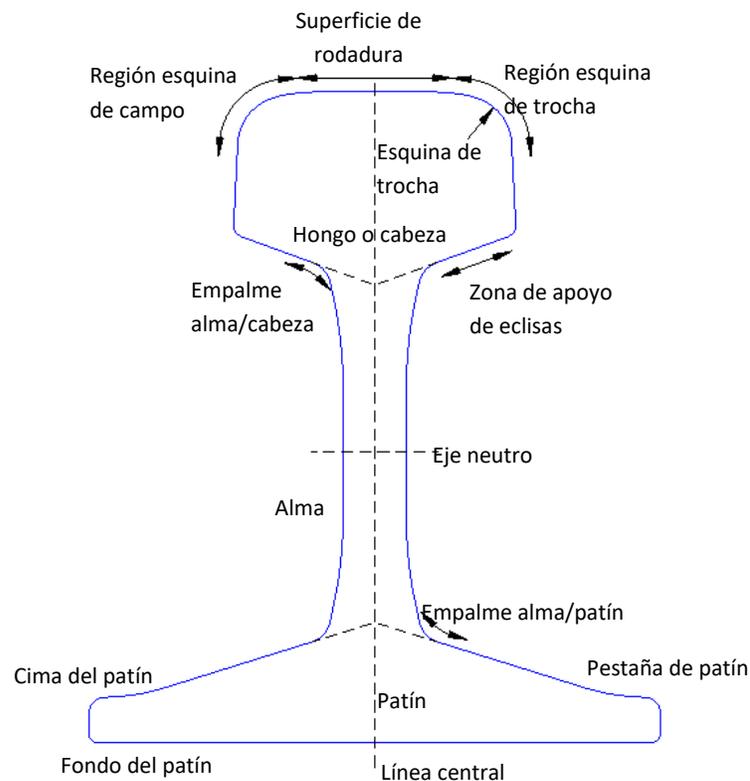


Figura 1. Terminología empleada para la ubicación de las partes de un riel.

1.4 Generalidades sobre ensayos no destructivos

A continuación, se mencionarán algunas generalidades sobre ensayos no destructivos con el fin de que se comprenda mejor las técnicas propuestas para detectar y evaluar algunos de los todos los defectos que se presentan en este documento. No nuestra finalidad desarrollar en profundidad los métodos no destructivos que se pueden emplear; pero, no obstante, es importante relacionar las características de los defectos estudiados con el tipo de método que es posible emplear.

Según [5]:

“Los Ensayos no Destructivos END (castellano) Non Destructive Testing NDT (inglés) son herramientas fundamentales y esenciales para el control de calidad de materiales de ingeniería, procesos de manufactura, confiabilidad de productos en servicio y mantenimiento de sistemas, cuya falla prematura puede ser muy costosa.

Se definen como aquellos métodos de ensayo utilizados para examinar o inspeccionar un material o un sistema sin impedir la utilidad futura del mismo.

Investigan específicamente la integridad material del objeto ensayado para permitir establecer el desempeño futuro del mismo.

Son de fundamental importancia para la detección, análisis y evaluación de discontinuidades, defectos y para la caracterización de materiales.”

Discontinuidad: Se considera como discontinuidad a: cambios en la geometría de un componente; huecos; grietas; composición inhomogénea o fuera de los parámetros de diseño; cambios en la microestructura o propiedades del material; falta de continuidad o cohesión; interrupción o variación en la estructura o configuración física normal de un material o componente. Considerando **como deben ser informadas**, existen dos clasificaciones de discontinuidades:

- **Discontinuidades relevantes:** son aquellas que por alguna de sus características (longitud, diámetro, ubicación, forma, etc.) **deben ser interpretadas, evaluadas e informadas**. Luego, en la mayoría de los casos, los componentes con indicaciones relevantes son cambiados o reparados; o, por lo menos, se les establece un seguimiento con menores intervalos de tiempo. Hay que tener en cuenta que, generalmente, el personal que realiza los END no es el mismo que repara o reemplaza el componente dañado.

- **Discontinuidades no relevantes:** son aquellas que por sus características **se interpretan, pero no se evalúan**, pero **deben ser registradas**.

En END la palabra **evaluar** se refiere a *cuantificar el daño que representa una indicación relevante*.

Defecto: Es una o más discontinuidades relevantes cuyo tamaño, forma, orientación, localización o propiedades no cumplen con un criterio de aceptación especificado y que deben ser rechazadas.

Una *discontinuidad rechazada*, quiere decir que ese componente tiene que ser reemplazado o reparado, según el defecto que presente.

Tipos de discontinuidades. Según sus características se clasifican en:

- **Según su forma:** volumétricas, planares y lineales (se considera lineal cuando su longitud es por lo menos tres veces su ancho).
- **Según su posición:** superficiales, subsuperficiales e internas.
- **Según su origen:** de proceso primario (durante la producción de la materia prima: lingote, tocho, palanquilla, etc.); de proceso secundario (trabajado mecánico en frío o en caliente); de transformación (tratamientos térmicos); de terminación o instalación (incluye defectos introducidos por soldaduras, amolados, cortes, golpes, etc.); de servicio (durante el ciclo de trabajo, en el caso de los rieles y otros componentes ferroviarios, se los llama introducidos por el tráfico).

En el lenguaje coloquial el término defecto se usa para referirse a cualquier indicación; no obstante, al realizar un informe de END se debe respetar su diferencia.

El tipo de discontinuidad que se presente determinará el método de END a utilizar. Por ejemplo, los defectos superficiales no pueden ser detectados y evaluados por ultrasonido (US), pero sí se pueden emplear corrientes inducidas (CI). Los defectos subsuperficiales son casi imposibles de detectar por US; y según su tipo y profundidad pueden ser evaluados por CI. A la inversa, un defecto interno en un material conductor, como un riel, no puede ser detectado y evaluado por CI y para este tipo de defectos en rieles se emplean, generalmente, técnicas ultrasónicas. Estas diferencias se deben a que el US penetra en el material del riel; mientras que la penetración de las CI se limita a unos pocos milímetros debajo de la superficie. Por lo tanto, para realizar una inspección por END se debe conocer la defectología del componente, las solicitaciones a las cuales este está sometido y el método más conveniente para esa situación.

Para que quede más claro lo que se quiere decir, veamos algunos defectos introducidos más adelante: Las fisuras tipo head check de las Figuras 17 y 18, evidentemente, son defectos superficiales; estas fisuras no pueden ser evaluadas por US y se debe aplicar CI. Los squats incipientes, Figuras 27 y 28, comienzan como fisuras subsuperficiales; por lo tanto, también se detectan y evalúan por CI y no por US. El detalle de fractura de la Figura 29, muestra como un squat se propagó formando un defecto interno planar, en un plano transversal al riel; si se utilizaran CI para evaluar este daño sólo se estarían evaluando los primeros milímetros, por lo que el daño completo se logra cuantificar por US. En este ejemplo surge algo muy importante en los END, y es que, en su aplicación, **los diferentes métodos son complementarios y no excluyentes**. Dos ejemplos más de esto mismo los tenemos en las Figuras 25 (donde se propagó una fisura tipo head check) y en la Figura 37 (donde se propagó el daño producido por una quemadura de rueda). Como último ejemplo, en la Figura 13 se tiene la propagación de un defecto interno de fabricación (inclusión frágil en ese caso), el desarrollo de este defecto planar interno se evalúa por US.

Existen otros métodos de END; pero US y CI son los más utilizados en rieles en servicio en la actualidad. El método que siempre está presente es la inspección visual. Otros métodos como líquidos penetrantes o partículas magnéticas se suelen emplear en el ámbito ferroviario; pero su aplicación es localizada y con ellos no se puede pensar en una inspección automática sobre un tren instrumentado, que es lo que se busca actualmente.

Capítulo 2

Movimientos, cargas y esfuerzos soportados por el riel

2.1 Introducción

Previo a tratar el objetivo principal de este documento, que es analizar los distintos tipos de defectos asociados a los rieles y los métodos de ensayos no destructivos posibles de aplicar en estos componentes, es necesario introducir la terminología asociada a las direcciones de las cargas y esfuerzos que generan el inicio de los defectos y su posterior crecimiento en los rieles.

La Figura 2 ilustra la terminología empleada para describir las direcciones referidas al riel.

- Dirección longitudinal: se desarrolla longitudinalmente a lo largo del perfil, en un plano vertical.
- Dirección transversal: a través del riel.
- Dirección vertical: perpendicular al riel.

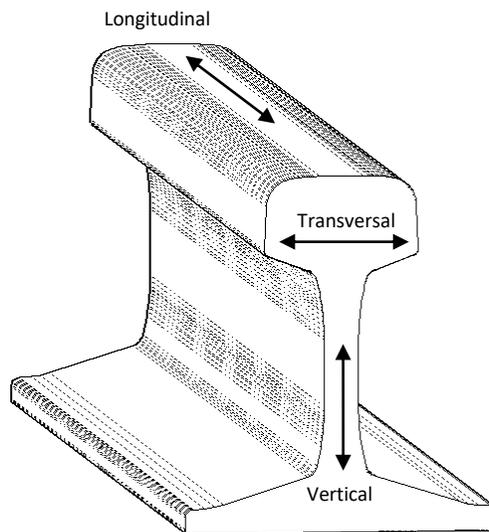


Figura 2. Terminología referida a las direcciones en el riel.

La Figura 3 ilustra la terminología empleada para describir los planos en el riel.

- **Plano vertical:** Vertical a lo largo del riel. Se pueden tener más de un plano vertical.
- **Plano horizontal:** Horizontal a lo largo del riel. Se pueden tener más de uno.
- **Plano transversal:** Transversal al riel. Existe uno solo.

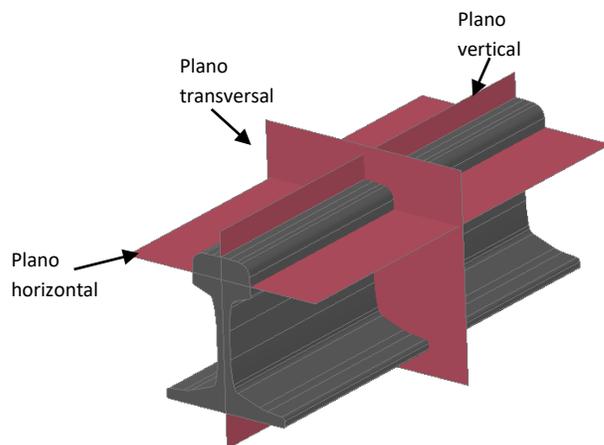


Figura 3. Terminología referida a los planos en el riel.

2.2 Movimientos anormales de los vehículos

Para poder sustentar un criterio de conservación de la vía, es necesario realizar una evaluación más precisa de la relación entre los defectos de la vía y los movimientos perturbadores que los provocan, y que se producen en el tren rodante bajo formas de oscilaciones anormales.

Estos movimientos son por efecto de **rotación** y **traslación** y **provocan esfuerzos anormales** que los clasificaremos de la siguiente manera:

- a) por efecto de rotación** (considerando el **comportamiento del vehículo con respecto a la vía**);
- b) por efecto de traslación** (los cuales son **provocados por la tracción**).

En la Figura 4 se muestran este tipo de movimientos; los cuales se pasan a desarrollar a continuación.

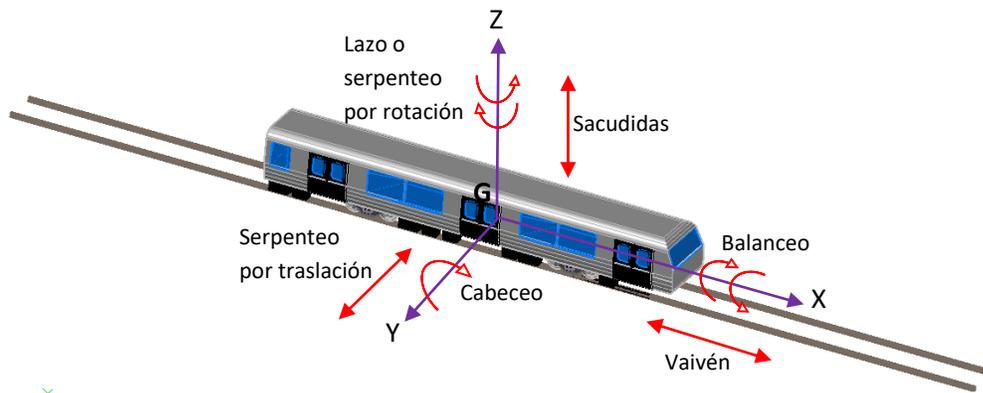


Figura 4. Clasificación de los movimientos del tren.

a) Por efecto de rotación – COMPORTAMIENTO DEL VEHICULO CON RESPECTO A LA VIA.

1. Alrededor del eje horizontal longitudinal – eje GX de la Figura 4 – **BALANCEO**.
2. Alrededor del eje horizontal transversal – eje GY de la Figura 4 – **CABECEO**.
3. Alrededor del eje vertical GZ de la Figura 4 – **LAZO**.

Balanceo, es el movimiento de la parte superior del vehículo alrededor de un eje paralelo a la vía (eje GX en la Figura 4), ver Figura 5. Estos son producidos por defectos aislados en la nivelación transversal (alabeo) y tienen una influencia nefasta en la alineación de la vía produciendo desgaste anormal del riel.

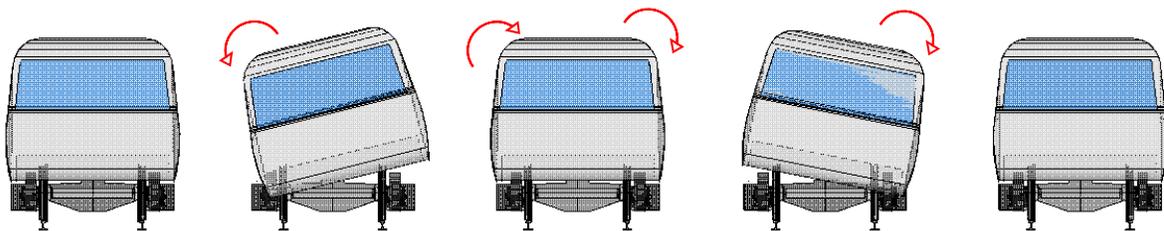


Figura 5. Balanceo.

Cabeceo, es el movimiento de la parte superior del vehículo alrededor de un eje horizontal, perpendicular al riel (eje GY en la Figura 4), ver Figura 6. Todo vehículo adquiere este movimiento cuando el primer eje encuentra un defecto de perfil del riel, juntas bajas y pendientes bruscas.

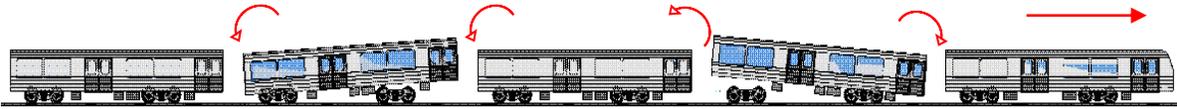


Figura 6. Cabeceo.

Lazo, es el movimiento del vehículo completo alrededor de un eje vertical, perpendicular al eje de la vía (eje GZ en la Figura 4), ver Figura 7. Es el más importante desde el punto de vista de la estabilidad y resulta de los movimientos de pivoteo y de traslación. Estas oscilaciones provienen de la necesidad de admitir un juego entre las pestañas de las ruedas y las líneas directrices de la vía, aún en recta, para facilitar el rodamiento. El juego permite a los vehículos oscilar de derecha a izquierda y viceversa, bajo la influencia de las características del trazado (recta, curvas, transiciones, peralte, etc.).

Este fenómeno se produce sin choque mientras la carga lateral no sea lo suficientemente grande; en caso contrario se produce con choque y, además, puede provocar el deslizamiento transversal de la rueda sobre el riel.

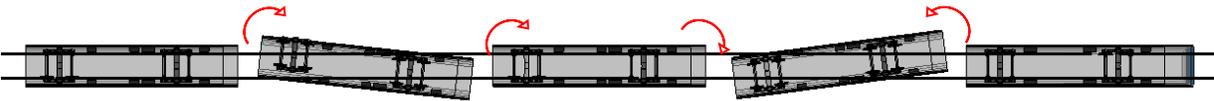


Figura 7. Lazo.

b) Por efecto de traslación – SON PROVOCADOS POR LA TRACCIÓN.

4. Según el eje longitudinal GX de la figura 4 – **VAIVEN**.
5. Según el eje transversal GY de la figura 4 – **SERPENTEIO**.
6. Según el eje vertical GZ de la figura 4 – **SACUDIDAS**.

Vaivén, es el movimiento del vehículo completo paralelo a los rieles en sentido longitudinal, Figura 8.

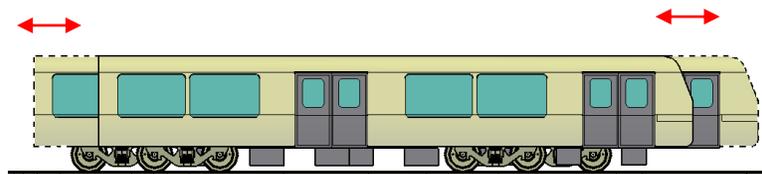


Figura 8. Vaivén.

Serpenteo, es el movimiento del vehículo en dirección perpendicular-horizontal a los rieles, Figura 9.

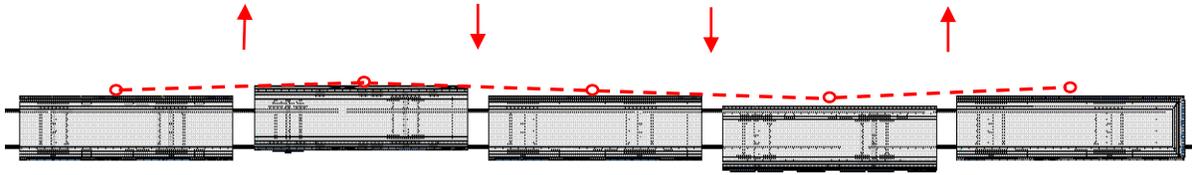


Figura 9. Serpenteo.

Sacudidas, es el movimiento de la parte superior del vehículo en el sentido vertical, Figura 10.

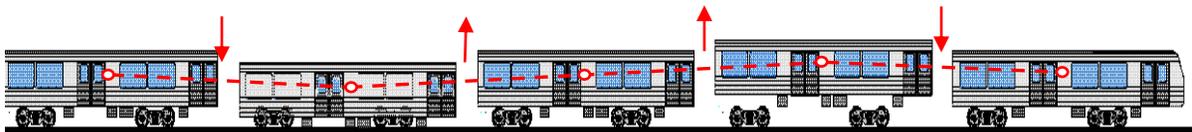


Figura 10. Sacudidas.

2.3 Cargas en rieles

La carga estática es la estimada por eje (en Tn/eje). En los ferrocarriles de carga se calcula que la carga estática llega a 35 Tn/eje. Mientras que la carga dinámica se puede estimar como el incremento sobre la carga estática que se produce a medida que se aumenta la velocidad del vehículo. Como otro ejemplo extremo, se puede mencionar que, en líneas de alta velocidad, actualmente se alcanzan velocidades que superan los 300 Km/h. Por otro lado, estos componentes están sujetos a altas sollicitaciones laterales por el empuje de las ruedas, especialmente en las curvas pronunciadas. Además, las cargas se ven aumentadas cuando se producen los movimientos anormales, descritos en la sección anterior. En esta sección se detalla la terminología empleada para la carga aplicada sobre los rieles debido a la interacción con las ruedas.

Carga vertical: Es la carga aplicada por la pisada de la rueda a todo el riel *bajo condiciones normales de operación*, ver Figura 11. Este tipo de carga puede tener tres componentes:

- **Componente estática o nominal:** Es la carga equivalente del peso bruto del vehículo dividido por el número de ruedas. Cabe mencionar que usualmente se citan las cargas nominales por eje. Sin embargo, para el desarrollo de defectos en rieles haremos referencia a la carga sobre las ruedas, cuyo valor depende del peso del vagón. También debemos mencionar que, en vías curvas, dependiendo del peralte de la vía y de las velocidades de operación, las cargas nominales de las ruedas aplicadas sobre los rieles de alta y de baja pueden diferir aproximadamente un 20 – 30% (en este caso rieles de *alta* y de *baja* se refieren a los rieles que están en la *parte superior e inferior del peralte*, respectivamente).
- **Componente dinámica:** Es la carga que se incrementa sobre el valor de la carga estática a medida que el vehículo aumenta la velocidad, debido a la dinámica vertical de los bogies interactuando con la geometría de la vía.
- **Componente de impacto:** Consiste en el incremento adicional sobre las componentes estáticas y dinámicas que ocurre cuando una rueda viaja sobre el riel debido a una corta irregularidad vertical; tales como defectos en la soldadura, juntas mecánicas, corrugaciones, quemaduras severas en las ruedas, etc.; o si la rueda tiene aplanaduras o presenta ovalidad. En el último caso, el efecto que se percibe es un martilleo constante sobre el riel.

Por lo tanto, *la carga vertical real aplicada al riel se determina sumando todas estas componentes.*

Bajo consideraciones reales de operación, es frecuente que el mal ajuste de los resortes de suspensión distribuya los pesos en forma desigual, aumentando una componente y reduciendo otra. Estos pesos mal distribuidos afectan considerablemente el efecto de los movimientos de lazo, balanceo, etc.; como así también las vibraciones causadas por las irregularidades de la vía en la parte no suspendida del vehículo; haciendo que la carga real aplicada sea considerablemente mayor que la carga nominal.

Carga lateral: Esta es la carga usualmente aplicada por la pestaña de la rueda a los rieles en las curvas (ver Figura 11), debido a las fuerzas que curvan el conjunto ruedas-bogie. Sin embargo, en curvas poco pronunciadas, o aún en caminos rectos, se pueden producir cargas dinámicas laterales considerables cuando el conjunto de ruedas-bogie y/o vehículo tienen un comportamiento dinámico lateral alto (oscilación lateral). A esto se suma los movimientos de lazo y de balanceo, que en mayor o menor grado son inevitables. Este tipo de cargas tienden a forzar los rieles hacia el exterior de las curvas, forzando las fijaciones.

Cargas de fluencia¹: Las cargas de fluencia se generan en la zona de contacto rueda-riel, debido a la acción muy localizada de la rodadura de la rueda sobre el riel, ver Figura 11. Se refiere a las cargas que pueden producir deformación plástica sobre el riel. El área de la superficie de contacto rueda-riel generalmente se encuentra entre los 1.5 y 3 cm²; llegando hasta los 5 cm² en el caso de ruedas y/o rieles deteriorados o defectuosos²; esto genera elevadas tensiones en esa zona. Por lo tanto, la interfase rueda-riel es la parte más crítica del riel en servicio debido a las elevadas tensiones de interacción y al número de ciclos de pasadas por día, junto con altas cargas en los ejes y/o velocidades relativamente altas.

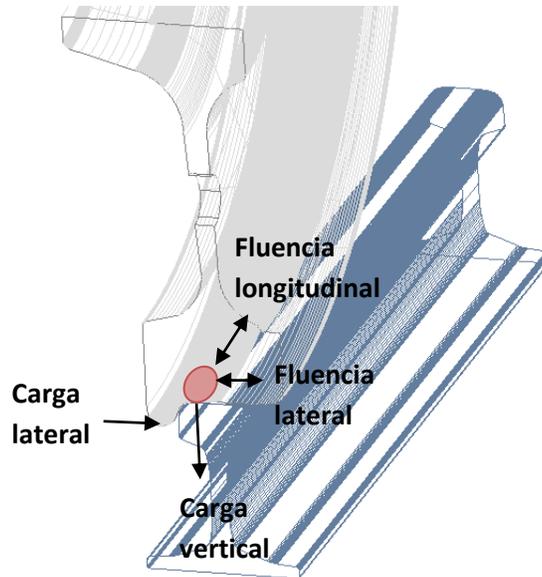


Figura 11. Terminología empleada para las cargas.

Las **cargas de fluencia en la dirección longitudinal** se producen generalmente cuando las ruedas ejercen algo de tracción sobre el riel, o cuando el conjunto sólido de ruedas trata de acoplarse a una curva pronunciada y compensar la diferencia de contacto entre los diferentes diámetros de rueda con el riel.

Las **cargas fluencia en la dirección lateral o transversal** se presentan cuando el conjunto de ruedas oscila lateralmente en el riel. *A menudo, se producen ambas cargas de fluencia, longitudinales y laterales*; por ejemplo: cuando un eje montado intenta acoplarse a una curva en un modo de mal alineamiento.

¹ En alguna bibliografía, a este tipo de cargas se las suele llamar cargas de creep; aunque en rieles estas cargas no cumplen con las condiciones de lo que se conoce, comúnmente, como creep o fluencia lenta.

² Ver [6] en la bibliografía.

2.4 Esfuerzos en la vía férrea

La vía constituye un conjunto que *tiene que ser resistente y a la vez también debe ser elástica*. Los esfuerzos que se consideran en esta sección se refieren a los que afectan al riel completo o a cierta longitud de este; como ser la distancia entre durmientes, la sección transversal, o las partes de sujeción (por ejemplo, con las eclisas). Como aproximación podríamos imaginar a los rieles (o a partes de estos) como vigas, en las que también se deben considerar los esfuerzos en la sección.

Si la vía fuese un conjunto armado completamente rígido e indeformable, el resultado sería una serie de reacciones muy violentas al paso de los trenes. No obstante, ésta debe ser lo suficientemente resistente como para no adquirir deformaciones permanentes o plásticas al paso de las cargas móviles, las cuales frecuentemente son de valores elevados.

La vía como está concebida debe servir, al mismo tiempo, como *soporte de las cargas y guía de los trenes*, lo que termina siendo una solución de compromiso. El hecho que debe existir un espacio entre la pestaña de la rueda y el riel obliga a tener un juego u holgura que, si bien reduce la fricción, aumenta los movimientos laterales y/o transversales.

Esfuerzos de Flexión: La flexión en los rieles puede ocurrir debido a diversos factores, ver Figura 12:

- **Carga vertical aplicada por las ruedas**, la cual causa flexión vertical entre los durmientes. Esto conlleva a esfuerzos longitudinales de tracción en el patín y de compresión en la cabeza del riel.

La carga vertical también puede causar flexión vertical en el alma. Esto conlleva a que se presenten esfuerzos longitudinales de tracción sobre las eclisas.

- **Carga lateral aplicada por las ruedas**, ésta causa que la cabeza del riel se mueva lateralmente respecto al patín. Esto genera esfuerzos verticales de tracción en el alma del riel. Esta carga también incrementa los esfuerzos longitudinales sobre las eclisas ubicadas en el lado de campo.
- **Carga vertical descentrada**, que es aplicada a una cierta distancia de la línea central del riel; por ejemplo: cuando zonas de cavidades en la rueda entran en contacto con las zonas planas del riel. Esto conlleva a la torsión del riel, lo cual puede causar esfuerzos de tracción vertical adicionales en el alma del riel y esfuerzos longitudinales de tracción en las eclisas.

Esfuerzos térmicos: Estas tensiones se producen en los rieles largos soldados o continuamente soldados. Son a causa de la expansión térmica longitudinal y la contracción que se producen cuando la temperatura real del riel aumenta por encima o se reduce por debajo, de la temperatura libre de tensión a la que los rieles han sido soldados en campo, ver Figura 12.

- Cuando la temperatura de los rieles está por encima de la condición libre de tensiones, se establecen esfuerzos longitudinales de compresión.
- Cuando la temperatura de los carriles está por debajo de la condición libre de tensiones, se establecen esfuerzos longitudinales de tracción, que influyen en el desarrollo de defectos del riel, en particular en el plano transversal.

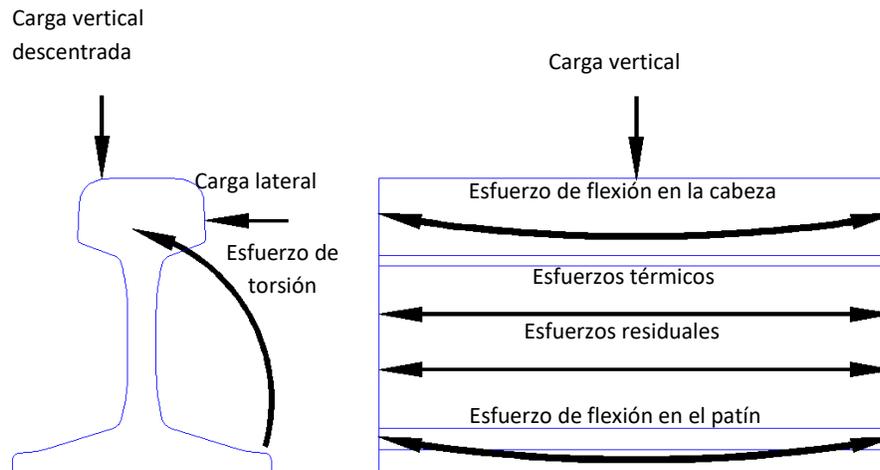


Figura 12. Esfuerzos soportados por el riel.

Tensiones residuales: Estas tensiones (o esfuerzos) se producen en algunos rieles (a veces llamados de “primera calidad”), debido a los procesos termo-mecánicos de fabricación que se aplican. En particular durante el enderezado por rodillos y el endurecimiento en la cabeza del riel. El término primera calidad hace referencia a los rieles que se emplean en lugares donde están sujetos a mayores esfuerzos, como por ejemplo cerca de las estaciones y andenes.

También se generan tensiones residuales tanto en la soldadura a tope y en la soldadura aluminotérmica del riel, debido a la expansión diferencial y la contracción del metal que se produce durante el proceso.

Las características de las tensiones residuales son altamente variables y no debe subestimarse su efecto. Por ejemplo, tanto el proceso de endurecimiento de la cabeza del riel y las soldaduras aluminotérmicas pueden presentar esfuerzos verticales muy altos en el alma del riel. Por otro lado, el endurecimiento en la cabeza puede presentar esfuerzos longitudinales en la cima de la cabeza y el patín, y esfuerzos longitudinales de compresión en el alma y el lado de la cabeza, ver Figura 12.

Otros esfuerzos longitudinales: Los procesos de frenado y de aceleración producen, también, esfuerzos longitudinales que tienden a desplazar y/o producir corrimiento de los rieles, afectando la posición original de estos. Esto ocurre en donde los trenes deben parar y arrancar nuevamente, sectores de andenes de estaciones, fuertes pendientes, etc.

Otro desplazamiento longitudinal de los rieles es el que producen el choque o golpeteo de las ruedas sobre las juntas; o las deformaciones elásticas de los rieles que produce una especie de ondulación. También, como se mencionó recién, los esfuerzos térmicos pueden desarrollarse en la dirección longitudinal, tanto en elevadas temperaturas como en bajas temperaturas, ver Figura 12.

2.5 Vida útil de los componentes ferroviarios – rieles

Desarrollo de los defectos

Es importante tener en cuenta que es muy difícil predecir la vida útil del riel y/o el desarrollo de los defectos. Esto se debe a la gran cantidad de factores que hacen que la rodadura de los trenes se aleje de la situación ideal. Sin embargo, el estudio de la defectología permite encarar acciones para mejorar la conservación y, por lo tanto, prolongar la vida útil. Conocer la defectología también es fundamental para poder planificar qué métodos de END son convenientes aplicar para la detección, evaluación y seguimiento de los defectos en rieles. Los ensayos no destructivos son una actividad multidisciplinaria, donde además de la aplicación del método elegido, se deben conocer ciertos aspectos del componente a evaluar: aspectos de diseño, solicitaciones a las que está sometido, condiciones de seguridad para su funcionamiento, defectología característica (en caso de ser conocida), etc. Es decir, la aplicación de un END conlleva un estudio previo del componente y del sistema del que forma parte; esto se aplica, para un riel de un sistema ferroviario, para un tubo en un intercambiador de calor o para cualquier otro componente.

Programas de mantenimiento de la vía

Estos programas consisten en cualquier procedimiento de mantenimiento de la vía que permite asegurar que las vías siguen brindando el soporte adecuado. Algunos de los aspectos que se tienen en cuenta en estos programas son: *reducción de la flexión del riel*, *control adecuado de la fricción*, *conservación del perfil del riel*. No es el objetivo de este documento desarrollar un programa general de mantenimiento; sin embargo, algunos de los factores de estos programas se deben conocer mínimamente para entender la aparición y desarrollo de defectos.

La vida útil de un riel se determina principalmente por tres factores:

Desgaste: A través de las cargas y de la circulación de los trenes, los rieles se desgastan en vertical y lateralmente por el contacto con la pestaña de la rueda (fenómeno conocido como *contacto rueda/riel*). El mayor desgaste lateral de los rieles se produce en el riel exterior de las curvas, principalmente en la cara interior del riel y en la región esquina de trocha. En vías rectas, por deficiencias en la alineación y nivelación se producen, también, desgastes laterales. Estos ocurren, debido a las elevadas fuerzas que generan las pestañas

de las ruedas; exacerbadas por los efectos de serpenteo (Figura 9), lazo (Figura 7) y, en menor medida por el balanceo (Figura 5).

El desgaste también se presenta en la superficie de rodadura del riel debido a la interacción rueda/riel y también debido al mantenimiento de este (proceso de amolado).

Por otro lado, los desgastes de los rieles en las juntas dependen fundamentalmente del estado de éstas y del balasto.

Deformación plástica: Puede ocurrir en los rieles de alta o de baja, ante todo en curvas sujetas a elevadas cargas axiales de operación (en este caso rieles de *alta* y de *baja* rieles hacen referencia a la velocidad de operación de los trenes). Al igual que el desgaste, se presenta principalmente en la cara interior y en la región esquina de trocha del riel exterior de las curvas. El flujo plástico se debe a los esfuerzos presentes en el contacto rueda/riel que exceden la resistencia del material. Muchas veces la deformación plástica es el paso anterior a la aparición de defectos en rieles o la pérdida de material; que luego pueden propagarse hacia el interior y favorecer una rotura. Esto se debe a que la deformación plástica produce cambios microestructurales superficiales en la aleación del riel los cuales cambian sus propiedades mecánicas; por ejemplo, endureciéndola y haciéndola más frágil.

Los términos: rieles de alta o de baja hacen referencia a la velocidad de operación de los trenes.

Defectos: Se generan tanto en rieles como en ruedas, debido a una amplia variedad de causas. Si no se detectan a tiempo, los defectos crecen y posiblemente causan fallas en los rieles; o al menos adelantan la necesidad de aplicación de acciones de mantenimiento. Esto reduce su vida útil y hace más costoso el mantenimiento.

Las mejoras en los procesos metalúrgicos de fabricación de rieles (como el proceso de colada continua, la introducción de aceros de alto carbono con mayor resistencia al desgaste o la introducción de rieles con tratamientos de endurecimiento en la superficie de la cabeza); han reducido el desgaste y la ocurrencia de defectos internos en el alma o en la cabeza del riel con origen en el proceso de fabricación. Pero, por otro lado, la ocurrencia de fallas ocasionadas por la propagación de defectos superficiales inducidos por el tráfico y producidos por fatiga de contacto por rodadura, se ha vuelto mucho más común. Esto es debido a que los “nuevos rieles” han permitido que esos defectos se desarrollen; frente a la disminución de la ocurrencia de los defectos de fabricación y de los producidos por desgaste. Es decir que los nuevos materiales presentan mejor resistencia al desgaste, son más duraderos en el tiempo y tienen menor cantidad de fallas internas de fabricación; pero, por otro lado, los materiales se fatigan y muchas veces se generan defectos que se propagan sin mostrar evidencia de su daño real, ocasionando posteriores roturas. Ese proceso de fatiga es una combinación entre deformación plástica y ciclos de rodadura (es decir el tráfico).

Capítulo 3

Conceptos generales de fractura en rieles

3.1 Identificación del desarrollo de los defectos³

La identificación de la presencia y del desarrollo (o crecimiento) de los defectos es determinada por el **tipo de defecto** y la **dirección de crecimiento** en relación con los planos de la sección del riel.

El **tipo de defecto** hace referencia a características propias del defecto; entre las cuales se puede referir al proceso que le dio origen; ver sección 1.4.

En cuanto al **origen** podemos agruparlos en: **defectos de fabricación** (discontinuidades de proceso primario, secundario o de transformación de la sección 1.4), **defectos inducidos por el tráfico** (discontinuidades de servicio de la sección 1.4, estos son los más importantes hoy en día) y **defectos introducidos durante el montaje o mantenimiento** (discontinuidades de terminación o instalación de la sección 1.4). Cualquiera de estos defectos puede crecer y propagarse por el tráfico.

Considerando **los planos en que se desarrollan** tenemos: **defectos transversales** (se desarrollan principalmente en planos transversales); **defectos longitudinales** (en planos verticales y horizontales, en dirección longitudinal). Como podrá intuirse, existen defectos que se propagan en direcciones compuestas; contenidas en más de una proyección sobre los planos mencionados.

Existen otro tipo de clasificación que hace referencia a su **ubicación en el riel**, como los **defectos en la cabeza**, los **defectos en el alma** y los **defectos en el patín**.

Los defectos que se desarrollan principalmente en un plano transversal se consideran muy peligrosos; ya que su desarrollo transversal no puede evaluarse de forma visible. Esta propagación interna del defecto puede llevar a la ruptura repentina y catastrófica del riel. El tamaño del defecto transversal interno antes de la rotura catastrófica, sólo se puede identificar completamente al romperse el riel por su sección transversal (o al provocar la ruptura en laboratorio). Sin embargo, el daño se puede estimar a través de la inspección no destructiva aplicando ultrasonido o corrientes inducidas [7], [8] y [9].

³ Aquí, por **abuso de lenguaje** haremos un uso más amplio de la palabra defecto que lo que se definió en la sección 1.4.; nombrando en ocasiones como defectos a indicaciones que no lo son. En esa sección se definió como defecto a una o más discontinuidades relevantes cuyo tamaño, forma, orientación, localización o propiedades no cumplen con un criterio de aceptación especificado y que deben ser rechazadas. No obstante, los abusos de lenguaje, **cuando se hace un informe de END se debe emplear la terminología correcta**.

3.1.1 Tipos (o modos) de fractura

Para los metales se presentan dos modos de fractura: **dúctil** y **frágil**, [10].

Los **metales dúctiles** exhiben una sustancial deformación plástica con una alta absorción de energía antes de la fractura. Por el otro lado, en los **metales frágiles**, normalmente hay poca o ninguna deformación plástica con baja absorción de energía antes de la fractura. *Los términos dúctil y frágil son relativos*, si una fractura es de un modo o de otro depende de la situación: temperatura, tipos de cargas aplicadas, estado de tensiones, velocidad de deformación, estado del material, si hay fenómeno de fatiga. Comentamos aquí estos conceptos básicos de la ciencia de materiales porque ayudan a interpretar las superficies de fractura que se presentan en los rieles. Veremos como esas superficies de fractura nos permiten entender cierta defectología y nos muestran la necesidad de una inspección no destructiva periódica.

Cualquier proceso de fractura implica dos pasos: **i) formación del defecto (o crack)** y **ii) propagación o crecimiento**. En general, ambos pasos se dan como respuesta a una tensión impuesta. Como ya se mencionó, en el caso de los rieles el defecto puede ser originado en el proceso de fabricación o instalación y luego el tráfico contribuirá a la propagación de este.

El modo de fractura es altamente dependiente del mecanismo de propagación del defecto. La **fractura dúctil** se caracteriza por **zonas de extensa deformación plástica** en la vecindad del defecto iniciador del proceso. Además, el proceso avanza relativamente lento a medida que la longitud del crack se extiende. En **la fractura frágil, los defectos pueden propagarse extremadamente rápido**; y una vez comenzada la propagación, esta continuará sin incremento en la tensión aplicada hasta producir una fractura repentina y catastrófica sin ningún aviso. Además, como ya se mencionó, la deformación plástica que se produce durante la fractura dúctil hace que se absorba más energía durante el proceso de fractura; lo que hace mantener la resistencia del componente cuando se encuentre en este modo de fractura.

3.1.2 Fatiga

La fatiga es una forma de falla que ocurre en estructuras sujetas a tensiones dinámicas y fluctuantes. Bajo estas condiciones es posible que la falla ocurra a niveles de tensiones considerablemente menores que la tensión o límite elástico para cargas estáticas. El término fatiga se usa porque este tipo de falla normalmente ocurre después de un largo período de ciclos repetidos de tensión o deformación. La fatiga es la mayor causa de fallas en metales, se estima que el 90 % de las fallas en metales se producen por fatiga; también se produce en otros materiales. Generalmente la fractura por fatiga es de naturaleza frágil aún en metales dúctiles; en cuanto a que casi no presenta grandes zonas de deformación plástica asociada. Esto último no es estrictamente cierto en la mayoría de las propagaciones de los

defectos en rieles sometidos a las cargas cíclicas del tráfico: como veremos a continuación, en las fallas de los rieles existe una zona de deformación plástica mayor que en otros procesos de fatiga (en proporción a la superficie de fractura total). El proceso de fatiga ocurre con la iniciación de un defecto (paso **i**) formación del defecto (o crack)) y se continua con el crecimiento de este (paso **ii**) propagación o crecimiento).

3.1.3 Tipos de crecimiento de defectos en los defectos transversales en rieles

Como su nombre lo indica, un defecto transversal es aquel que se desarrolla principalmente en la sección transversal de un riel. Los defectos transversales se consideran entre los más peligrosos, ya que su crecimiento produce una importante disminución de la resistencia del riel. Para este tipo de defectos se han identificado tres etapas de crecimiento de defectos: **crecimiento normal o fractura dúctil**, **crecimiento rápido** y **crecimiento repentino o fractura frágil**.

Crecimiento normal o fractura dúctil: Se lleva a cabo en etapas muy graduales durante un período considerable de tiempo. La superficie de fractura es lisa y bien definida, y en general es difícil distinguir los anillos de las diferentes etapas graduales. No hay limitación en el número de anillos de crecimiento, en la distancia entre los anillos o en el tiempo de desarrollo. Como puede verse, el nombre de este tipo de crecimiento se debe a que tiene las características de una fractura dúctil.

Cuando la propagación del defecto original se encuentra en este tipo de crecimiento es que debe ser detectado, evaluado y efectuar las acciones de mantenimiento necesarias. Cuando el defecto pasa al tipo de crecimiento rápido, ya suele ser demasiado tarde. En la actualidad se busca detectar los defectos o fisuras en su estado más incipiente posible, para evitar que avance la propagación incluso en su crecimiento normal o fractura dúctil.

Crecimiento rápido: Muestra el crecimiento del defecto en varias etapas pequeñas. La superficie de fractura es pequeña, pulida y bien definida, puede mostrar varios anillos de crecimiento con un aumento gradual de tamaño y se encuentra rodeada por una superficie granular áspera. Es una etapa intermedia entre la superficie de fractura dúctil y la superficie de fractura frágil, es decir entre el **crecimiento normal o fractura dúctil** y el **crecimiento repentino o fractura frágil**. En alguna bibliografía a este tipo de crecimiento no se lo describe como tal, sino que se lo indica como la zona de transición.

Crecimiento repentino o fractura frágil: Muestra un crecimiento del defecto en pocas etapas de gran extensión, generalmente es una sola etapa que lleva a la rotura repentina del componente. Es una superficie de fractura frágil, granular rugosa, que muestra uno o dos

anillos de crecimiento. La distancia entre los anillos aumenta en proporción con la tasa de crecimiento del defecto.

Estos tres tipos de crecimientos se desarrollan en tres etapas consecutivas, y generalmente en **un proceso de fatiga**, donde **las cargas cíclicas están dadas por el tráfico**. Además, están relacionados con los tipos de fractura que se mencionaron en **3.1.1** y describen el paso ii) de propagación de un proceso de fractura. La formación del defecto, paso i), puede deberse a un defecto de fabricación, a un defecto inducido por el tráfico o a un defecto introducido durante los procesos de montaje o mantenimiento. Cualquier tipo de defecto, una vez iniciado constituye un punto de concentración de tensiones, lo que favorece su propagación.

En la Figura 13, [11], se muestra una típica fractura de fatiga, iniciada en una inclusión (defecto de fabricación del riel); se indican: el crack de iniciación; la zona de crecimiento lento por fatiga (corresponde al crecimiento lento o fractura dúctil); la zona rápida final de fractura (corresponde al crecimiento repentino o fractura frágil). Las aureolas de transición entre las zonas mencionadas corresponden al crecimiento rápido (no está señalado así en la Figura 13). El defecto donde se inicia el proceso de fractura puede ser otro; pero en las superficies de fractura generalmente se pueden identificar los tres tipos de crecimiento.

Si en la superficie de rotura no existe una condición de fatiga visible, el fallo se denomina fractura frágil directamente. Esto suele ocurrir en soldaduras aluminotérmicas defectuosas; la Figura 14 muestra una soldadura aluminotérmica que rompió en modo frágil debido al debilitamiento producido por escoria atrapada.

Después de que el riel se rompe, la extensión de un defecto transversal antes de la rotura se mide contra el área de la sección transversal de la cabeza del riel. Por ejemplo, si la mitad de la sección transversal de la cabeza del riel muestra el crecimiento del defecto, el defecto se denomina fractura del 50%. En el ejemplo de la Figura 13 para reportar la dimensión de la rotura del defecto, aproximadamente se tendría que tomar el área delimitada por las aureolas, dividirla por el área transversal transversal del riel y multiplicarla por 100.

El término **detalle de fractura** se lo empleará a lo largo de este texto para pormenorizar las características de la superficie de fractura una vez que el defecto, ya sea superficial o interno, se hace crítico y produce la ruptura del componente. Es decir, la Figura 13 muestra un *detalle de fractura*, luego que un defecto interno (inclusión frágil) se propagó, se hizo crítico y se produjo la fractura del riel.

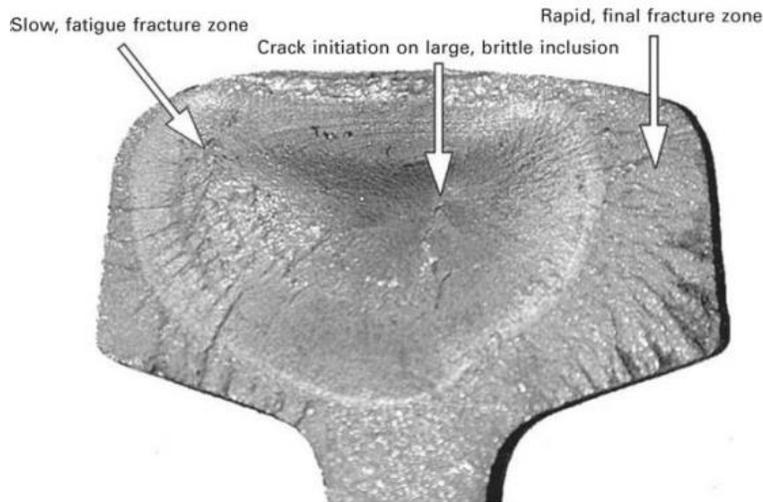


Figura 13. Detalle de fractura por fatiga. Slow, fatigue zone (crecimiento normal o fractura dúctil); Rapid, final fracture zone (crecimiento repentino o fractura frágil); el defecto de iniciación es una inclusión frágil, [11].



Figura 14. Detalle de fractura frágil, [12]. Soldadura aluminotérmica con escoria atrapada.

3.1.4 Rupturas de múltiples etapas o fractura compuesta

Existen defectos que se desarrollan en otras direcciones, además de las contenidas en los planos transversales al riel; por ejemplo, en direcciones angulares y longitudinales, o una combinación de direcciones transversales, angulares y longitudinales. Este crecimiento de defectos también produce etapas identificables de crecimiento similares a las descritas para los defectos transversales. Los detalles de fractura para este tipo de direcciones de propagación se denominan **fracturas de múltiples etapas**. En este tipo de rupturas también se incluyen defectos en agujeros de pernos de eclisas, en base de eclisas, y defectos de separación de la cabeza y el alma. Cuando un defecto muestra múltiples etapas de desarrollo, cada etapa se considera una etapa de desarrollo por separado. En ocasiones se los denomina fracturas compuestas, como la presentada en la Figura 15, [13].



Figura 15. Fractura compuesta, con un detalle de fractura en múltiples etapas, [13].

Capítulo 4

Defectos en rieles

En este capítulo se hace un resumen de la defectología más común presentada en rieles, según la bibliografía consultada. Se describen los procesos que dan origen a algunos de los defectos y las fallas que producen.

4.1 Fatiga de contacto por rodadura (FCR)

En servicio, los rieles ferroviarios están sometidos a grandes esfuerzos normales y de corte, intensas deformaciones plásticas y desgastes. Todo lo mencionado conduce a la degradación de su integridad estructural en el tiempo y trae como consecuencia una de las principales razones de accidentes ferroviarios actuales en servicio: fallas en los rieles causadas por la propagación de defectos superficiales y subsuperficiales originados en la cabeza del riel. *Esos defectos superficiales tienen su origen en la interacción rueda-riel, por el fenómeno denominado fatiga de contacto por rodadura (rolling contact fatigue (RCF), en inglés) [14] y [15].* Por esta razón, dichos defectos se denominan, en forma general, como defectos de fatiga de contacto por rodadura o defectos inducidos por el tráfico.

Un aspecto importante de la infraestructura ferroviaria de las últimas décadas, que contribuyó a que los defectos de FCR se transformen en una de las principales preocupaciones actuales del mantenimiento de los rieles, es que los métodos modernos de producción de aceros y rieles, y las técnicas de construcción de vías han causado un cambio en la distribución de los defectos que tradicionalmente se detectaban en los rieles: Los aceros más homogéneos, los rieles más duros y resistentes al desgaste, han reducido en gran medida la existencia y propagación de defectos internos tales como inclusiones, poros o los ocasionados durante el montaje de la vía misma; pero por otro lado, han aumentado la frecuencia de aparición de defectos superficiales o subsuperficiales en la interface rueda/riel.

La fatiga de contacto por rodadura *es un proceso de destrucción gradual debido a la creación y crecimiento de grietas iniciadas en la superficie del riel, o a pocos milímetros por debajo*, hasta que el riel se rompe; todo este proceso se desarrolla bajo la influencia de las cargas de tráfico variable, que se transfieren al riel a través de la pequeña superficie de contacto rueda/riel. Este fenómeno es un serio peligro para el tráfico ferroviario y un problema importante para los administradores de infraestructuras ferroviarias en todo el mundo. El aumento de la densidad del tráfico, las cargas que ejercen el conjunto rueda-eje y la velocidad, así como la presencia de sustancias lubricantes (aceite, grasa o combustible) y de agua en los rieles contribuyen a este problema. En contraste con esto, la geometría correcta de la cabeza del riel y de la rueda; es decir, la geometría correcta del contacto rueda/riel y el mantenimiento adecuado (en el cuales los END son una pieza importante) pueden reducir los problemas debidos a FCR. Para minimizar los riesgos operacionales de los rieles, las propietarias de la infraestructura ferroviaria realizan amolados cíclicos como una acción de mantenimiento preventivo contra la FCR; pero en algunos casos este serio problema puede implicar un reemplazo prematuro de los rieles o ser el origen de una falla completa del riel en servicio. La experiencia indica que el ciclo de vida estándar de los rieles

puede verse muy reducido debido a daños producidos por FCR, si no se aplican a tiempo planes de detección y mantenimiento eficaces y adecuados [16]. Además, en el mundo, la importancia de la detección y el seguimiento de este tipo de defectos tuvo un impulso muy importante a partir del accidente fatal ocurrido en Hatfield, Inglaterra, en el año 2000; donde se determinó que defectos producidos por FCR e iniciados en la esquina de trocha fueron los causantes del accidente [17].

La interfase rueda/riel es la parte más crítica del riel, debido a las elevadas tensiones de interacción y al número de ciclos de pasadas por día, junto con altas cargas en los ejes y/o velocidades relativamente altas. Como ya se mencionó, el incremento de las exigencias sobre los rieles junto con las formas modernas de producción de estos, han aumentado la aparición de los defectos superficiales de FCR y, como consecuencia, los tipos predominantes de daño ferroviario son cada vez más a menudo inducidos por el tráfico, [18] y [19].

El área de la superficie de contacto rueda/riel generalmente se encuentra entre los 1.5 y 3 cm²; llegando hasta los 5 cm² en el caso de ruedas y/o rieles deteriorados o defectuosos [20]. Debido a esto se generan las enormes tensiones de interacción que causan deformaciones plásticas recurrentes de la microestructura del riel. Este efecto se incrementa por el deslizamiento de la rueda, y como consecuencia la capa superficial deformada del riel se endurece significativamente, en relación con el estado original del riel. Finalmente, el material se fatiga y aparecen los defectos. Una vez producido el daño, generalmente en forma de fisuras, los siguientes ciclos de rodadura producen la propagación de este hacia el interior de cabeza del riel. Durante este proceso de propagación si existe agua (u otro líquido) en la vía, puede penetrar dentro del defecto incrementando la presión y reforzando el crecimiento. Así se desarrolla un crecimiento del daño que es típico de un proceso de fatiga.

Este fenómeno afecta particularmente al riel exterior de curvas entre 500 y 5000 metros de radio, porque la pestaña de la rueda es empujada hacia la esquina de trocha, Figura 16 (a), [19]. En el caso de una vía recta la zona de contacto “debería” ser sobre la banda de rodadura; aquí, si bien las tensiones son diferentes y menores que en el caso de las curvas, el fenómeno también puede producirse, Figura 16 (b), [19]. Además, debe tenerse en cuenta que según la inclinación de la curva y el estado de los perfiles de la rueda y el riel (además del estado general del material rodante: bogie, ejes, etc.) pueden producirse más de un punto de incremento de tensiones sobre el riel (que lo señalado en la Figura 16), [20].

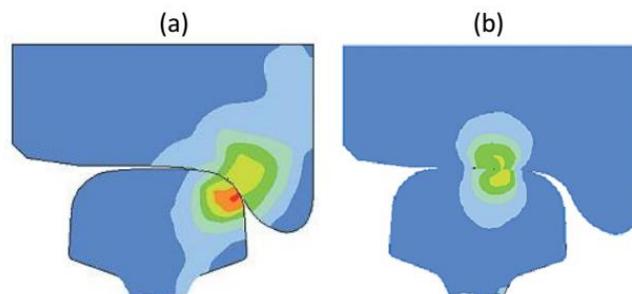


Figura 16. Tensiones de contacto en la interfaz rueda/riel, [19]: (a) en curvas cerradas, (b) en vías rectas.

Los defectos de FCR que más comúnmente se presentan son: “head checks” (HC) (Figuras 17 y 18), descascarillado⁴ (“shells” o “shelling”) (Figura 19) y “squats” (Figura 20) ([19], [21], [22], [23]); en menor medida se presentan descamaciones⁵ leves (“mild flakings”) (Figura 21 (a) línea Sarmiento, Argentina; Figura 21 (b) [13] y “belgrospi” [27] (Figura 21 (c)).

Los squats, el descascarillado en estado incipiente, los head check, las descamaciones y los belgrospi visualmente se observan como daños leves o de poca pérdida de material; pero esta apreciación puede ocultar el desarrollo de un daño más severo hacia el interior del riel.

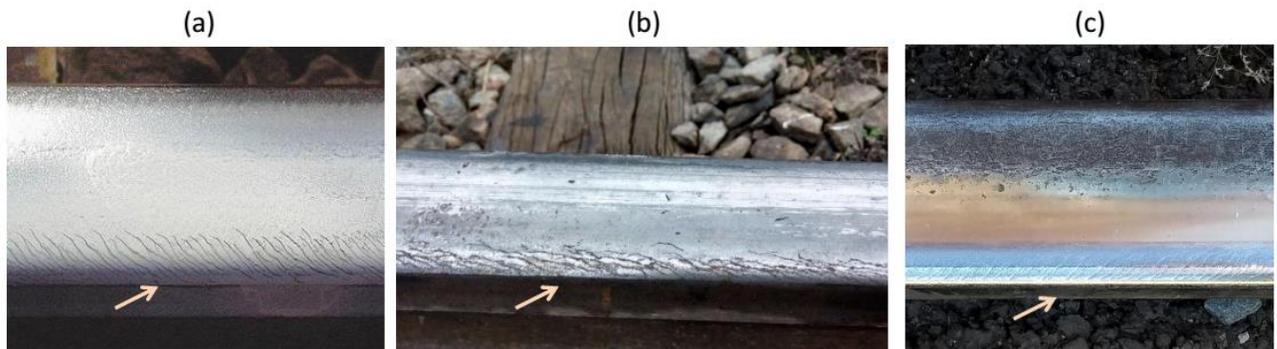


Figura 17. Head check en la región esquina de trocha. (a) Indicaciones de head checks, método de END de partículas magnéticas [19]. (b) Vía Línea San Martín, Argentina. (c) Vía Línea Sarmiento, Haedo, Argentina.

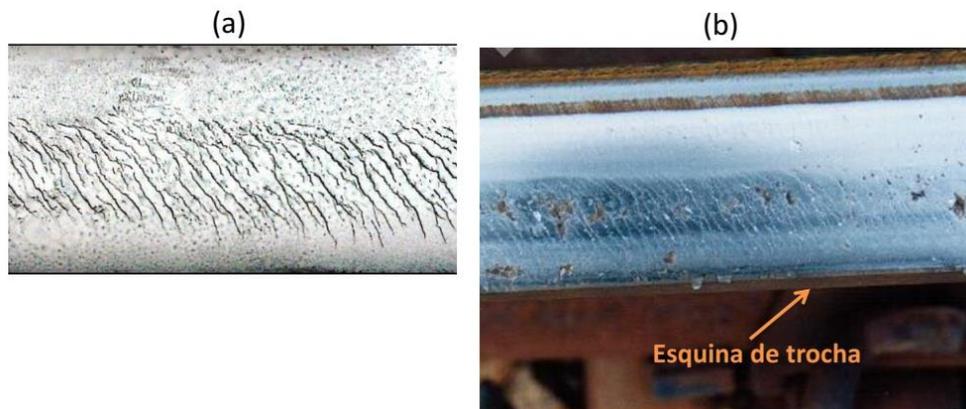


Figura 18. Head checks en la superficie de rodadura: (a) HC [13], (b) HC con descamaciones [23].

⁴ El descascarillado es una separación progresiva horizontal del material base del riel. El desprendimiento puede ocurrir en cualquier nivel del lado de trocha, usualmente en la esquina superior de trocha. El descascarillado se extiende longitudinalmente – no como una verdadera fisura horizontal o vertical – con un ángulo relacionado con la cantidad de desgaste del riel. El descascarillado puede girar hacia abajo para formar una separación transversal.

⁵ La descamación es una separación progresiva horizontal de la superficie de rodadura del riel, desde la mitad hacia la esquina de trocha, con escamado o despostillado de pequeñas astillas. La descamación no se debe confundir con el descascarillado, la descamación solo toma lugar sobre la superficie de rodadura cercana a la esquina de trocha y no es tan profunda como el descascarillado.

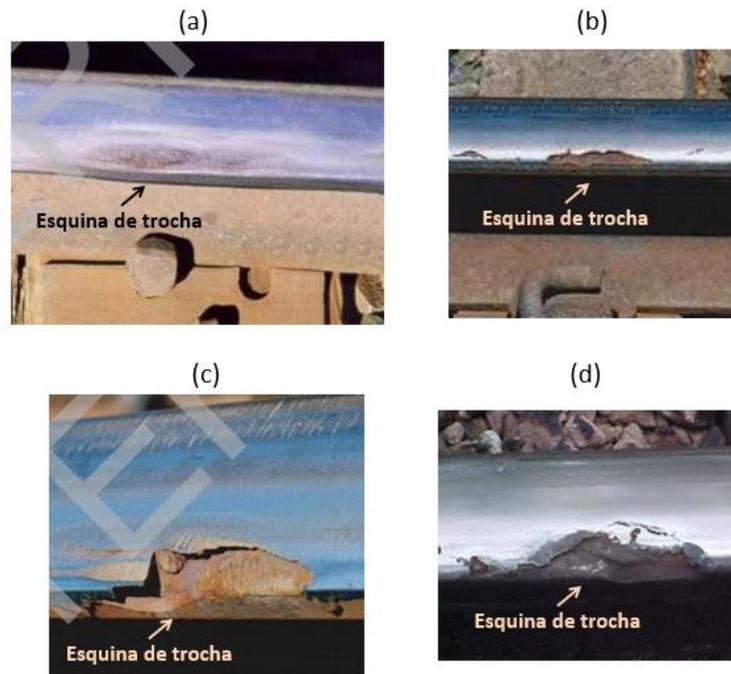


Figura 19. Descascarillado (shelling) en diferentes etapas, [23].



Figura 20. Squat, [21].

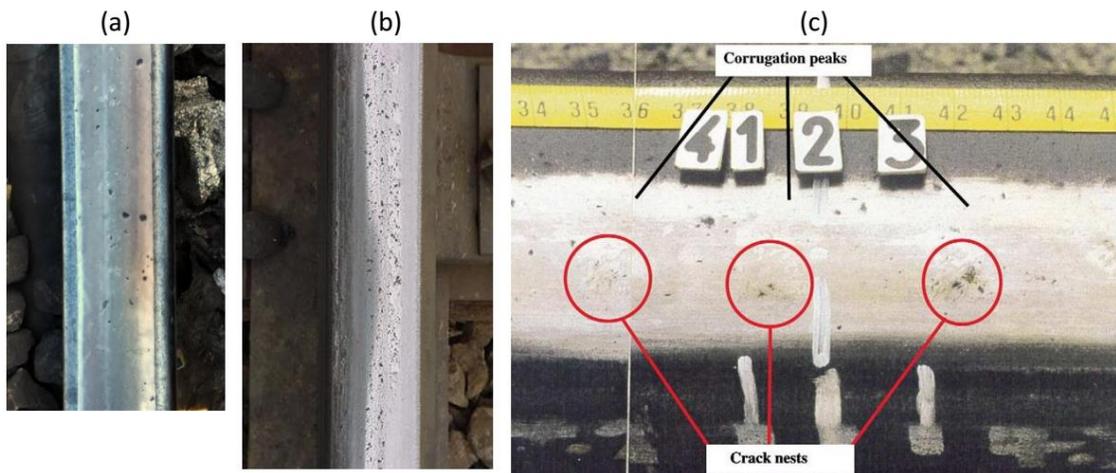


Figura 21. (a) y (b) descamaciones leves (mild flakings): (a) línea Sarmiento cercana estación Haedo, (b) [13]. (c) belgropsis (círculos rojos) en zona de corrugación, [24].

A menudo, una identificación de defectos sin ambigüedades no es fácil, dado que algunos tipos de daños muestran las características de otros tipos y, en otros casos, un daño puede desarrollarse a partir de otro. Por ejemplo: los daños conocidos localmente como descascarillados corresponden a un shelling severo con pérdida visible de material en la esquina de trocha (Figura 22 (a), [13]); el astillado severo en la superficie del riel (spalling, Figura 22 (b), [13]) pueden corresponder a un estado avanzado con pérdida de material en la superficie de rodadura de un daño iniciado como HC; o la descamación (flaking severo, Figura 22 (c), [13]) corresponde a pérdidas importantes de material desarrolladas a partir de HC en la esquina de trocha o en la superficie del riel cercana a la esquina de trocha.

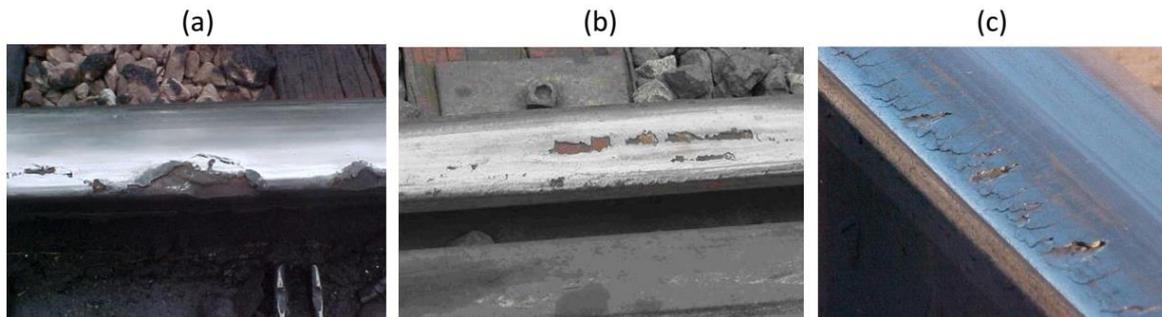


Figura 22. (a) descascarillado (shelling severo), (b) spalling (astillado severo) en la superficie del riel, (c) flaking severo (descamación) en la superficie del riel cercana a la esquina de trocha, [26].

Lamentablemente todos los defectos mencionados en el párrafo anterior, salvo los belgrospi, se observan en los ferrocarriles de Argentina; los belgrospi aparecen generalmente en trenes de alta velocidad, [24]. Sin embargo, las gerencadoras de los ferrocarriles locales aun no tienen una estrategia de gestión contra los defectos del riel producidos por FCR y las reglamentaciones técnicas para el mantenimiento de la infraestructura no incluyen inspección de estos defectos ferroviarios que permitan detectarlos de manera temprana. Los defectos de FCR, y los daños asociados, pueden ser localizados, identificados y cuantificados mediante la aplicación de ensayos no destructivos; y en particular, el método de corrientes inducidas permite detectarlos en su estado incipiente, ya que sus características lo hacen especialmente apropiado para detectar defectos superficiales y subsuperficiales en materiales conductores [19] y [22]. Si bien la aplicación de CI para detectar los defectos de tipo head check en forma prematura es un método que actualmente está dando muy buenos resultados, se aplica de modo complementario a la evaluación por ultrasonido de defectos volumétricos [18] y [25]. Esto es un aspecto común de los END, donde **los métodos aplicables no son excluyentes sino complementarios**; así el método de CI en rieles potencia y retroalimenta al método de US, el cual ya se aplica a rieles en el país.

Las Figura 17 (b) y (c) muestran defectos producidos por FCR en líneas ferroviarias argentinas; el caso de la Figura 17 (c) corresponde a HC incipientes en las cercanías de la estación Haedo de la línea Sarmiento; se debe mencionar que estas vías son relativamente nuevas, habían pasado menos de 10 años desde su renovación en el momento de la foto. La importante renovación de infraestructura en general (material rodante, vías, puentes, viaductos, etc.) que está llevando adelante el Estado Nacional, exige que se evalúe en rieles la existencia de defectos producidos por FCR en su estado incipiente; si se quiere lograr un

plan de mantenimiento exitoso. Esta afirmación se deduce de lo descrito más arriba sobre las causas más probables que originan el fenómeno de FCR en la actualidad: rieles nuevos que son más duros y resistentes al desgaste, en conjunto con formaciones que pueden desarrollar mayores velocidades, en un sistema que busca lograr un uso más intensivo del ferrocarril. Estos factores acrecientan las exigencias sobre los rieles y provocarán el desarrollo, cada vez más frecuente, de defectos de FCR inducidos por el tráfico.

Como puede verse el fenómeno de FCR da origen a una gran variedad de defectos; en la bibliografía, muchas veces, algunos de esos defectos son tratados separadamente sin dar una explicación de su origen. A continuación, se profundizará la descripción de algunos de los defectos producidos por FCR.

4.1.1 Head checks (HC)

Los **head checks** aparecen en la superficie del riel como un patrón de fisuras pequeñas (a veces conocido como patrón de piel de serpiente). Se producen principalmente en la región esquina de trocha Figura 17 pero también se pueden presentar en la parte superior de la superficie del riel como se muestra en la Figura 18. El término “head checks” surgió del aspecto de las fisuras que ocurren en la esquina de trocha; pero se utiliza también para el daño análogo producido sobre la banda de rodadura. Estas fisuras o cracks se extienden hacia adentro del riel en un ángulo de 15° a 30° con respecto a la superficie del riel en la dirección de rodadura, ver Figura 23, [26]; y ocurren en grandes cantidades distribuidas en toda la zona afectada, Figuras 17, 18 y 22 (c). En [26] se informa una distancia entre cracks de 0.5 a 7 mm y se evalúan fisuras producidas por HC con profundidades entre 1 y 6 mm. Luego de que aparecen, en etapas avanzadas de su crecimiento suelen ocasionar desprendimientos o descamaciones, las cuales pueden llegar hasta 15-10 mm de ancho y 3 mm de profundidad, [23], Figuras 18 (b), 22 (b) y (c).

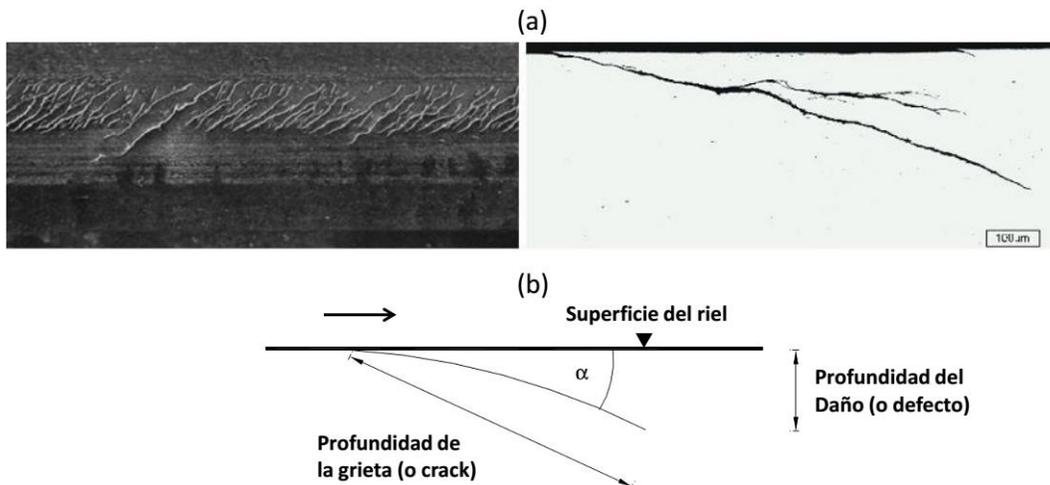


Figura 23: (a) [26], (b) [22], la flecha indica la dirección de rodadura.

La extensión o la profundidad de un head check no puede ser estimada observando solo su superficie visible. En la Figura 24 se muestra la superficie de fractura de un riel producida a partir de la propagación de un head check iniciado en la esquina de trocha, [19]; la fractura fue producida en un laboratorio a partir de head checks reales. En alguna etapa de su desarrollo, alguno de los head check tiende a cambiar su dirección de propagación hacia un plano de la sección transversal del riel, lo cual puede llevar a la rotura del riel en su etapa final. Lo importante en esta figura es notar cómo un HC se había propagado en forma transversal hacia el interior de la cabeza del riel: La dimensión de la propagación, de la Figura 24, no puede ser evaluada desde una observación de la superficie del daño; pero puede ser detectada por el método de END por CI; o incluso por US, por su gran penetración en la cabeza.

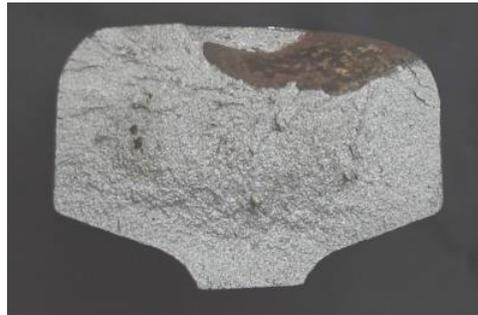


Figura 24. Superficie de fractura iniciada en un head check, en laboratorio, [19].

Cuando ocurre una fractura real ocasionada por FCR, la posibilidad de que se produzca una serie de fracturas causadas por otros HC existentes en la cercanía es muy alta; pueden romperse varios metros de riel, causando un descarrilamiento del vehículo involucrado, como ocurrió en el accidente de Hatfield, [27]. La superficie real de fractura que muestra un riel que falla en servicio por el crecimiento de un defecto producido por FCR, es la típica superficie de fractura por fatiga, Figura 25. En esta figura se distinguen las etapas de crecimiento descritas en 3.1.3: crecimiento normal o fractura dúctil, crecimiento rápido y crecimiento repentino o fractura frágil, [26]. En algún momento de su crecimiento, algún HC comenzó a crecer en una sección transversal de la cabeza del riel; esta es una de las situaciones más peligrosas por dos razones: el daño real no es visible y, además, el daño en sentido transversal produce un gran debilitamiento de la resistencia del riel. Muchos rieles fallan completamente antes de que se alcance el 15%, en proporción del área total, debido a los esfuerzos en la esquina de trocha de las curvas pronunciadas.

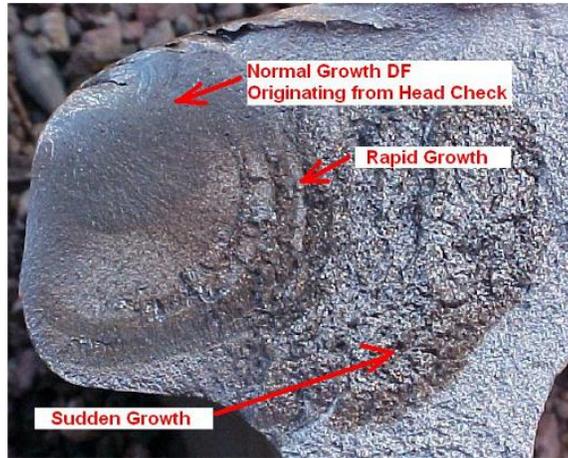


Figura 25. Detalle de fractura de un riel luego de una rotura ocasionada por la propagación de un head checks, [13].

4.1.2 Squats

Los squats son defectos que se pueden clasificar como superficiales o sub-superficie; suelen ser confundidos con quemaduras de ruedas y pueden ser de dos tipos, [21] y [23]:

(1) Los más comunes son los que se inician en forma subsuperficial debajo de la superficie de rodadura de la cabeza del riel, y son fácilmente identificables por inspección visual como manchas oscuras o “moretones” y se suelen llamar **squats de corona** (“rail crown squats”), Figura 26, [23].

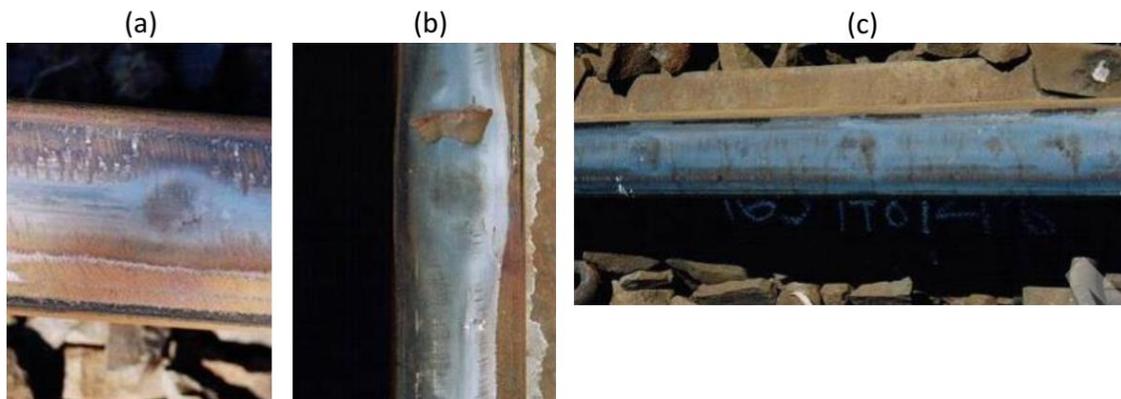


Figura 26. Ejemplos de squats de corona: (a) pequeño, (b) grande y (c) múltiple, [23].

La zona defectuosa aparece oscurecida, Figura 26, esto se debe a la existencia de cracks subsuperficiales que se extienden principalmente en un plano horizontal entre 3-5 mm por debajo de la superficie, Figura 27, [21]; esto causa una depresión en la superficie del riel. Cada squat de este tipo consiste en dos fisuras subsuperficiales mayores: una fisura principal que se propaga en la dirección de rodadura, y una fisura asociada que se

propaga en la dirección opuesta. La fisura principal suele ser varias veces mayor que la fisura asociada, y está formada por un crack principal y un número de cracks menores o secundarios que se ramifican desde el primero, como se ilustra en la Figura 27. Se cree que este tipo de squats se origina en micro-deslizamientos que tienen lugar detrás de la zona de adhesión de la rueda, por lo que se clasifican también como daño de FCR, [23] y [25].

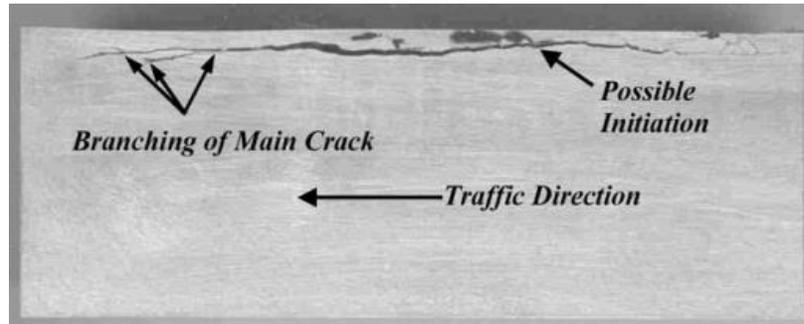


Figura 27. Sección transversal de un defecto tipo squats, [23].

(2) Son squats que se inician a partir de fisuras de head checks existentes en la esquina de trocha, Figura 28, [23]. Esos head checks eventualmente crecen lateralmente y se propagan en un plano horizontal (aproximadamente paralelo a la banda de rodadura) hacia el centro de la cabeza del riel; y en sus etapas de avance muestran un aspecto muy similar al otro tipo de squat. Por su origen, queda claro que este tipo de squats se clasifican como daño por RCF.

Ambos tipos de squats se producen principalmente en rieles de cabeza endurecida en curvas poco pronunciadas y en vías tangentes. También pueden ocurrir como defectos aislados o como múltiples defectos aislados, Figuras 26 y 28. La profundidad y la extensión del crack sub-superficial primario asociado a los squats, se pueden medir con una sonda ultrasónica de profundidad colocada sobre el riel, también pueden evaluarse por CI; por otro lado, la presencia de estos cracks puede apantallar la onda ultrasónica durante una inspección normal de US y ocultar la presencia de defectos más profundos.

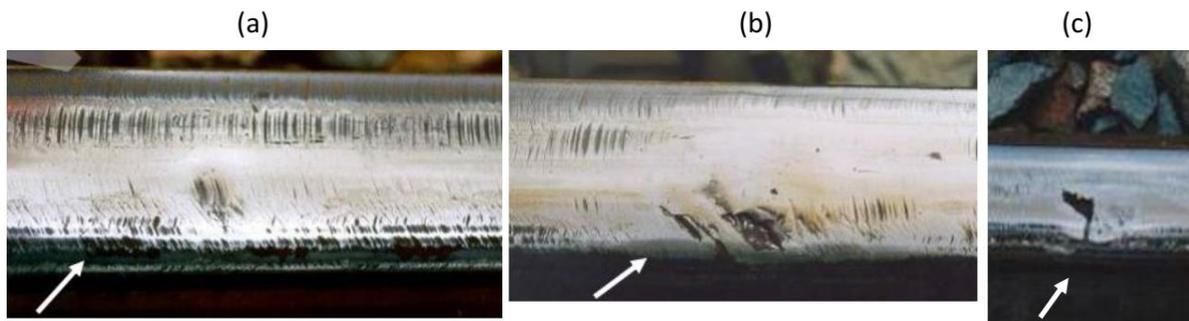


Figura 28. Ejemplos de squats iniciados en head checks de la esquina de trocha: (a) pequeño, (b) y (c) grandes; las flechas indican la esquina de trocha, [25].

Las depresiones en la banda de rodadura asociadas a este tipo de defectos, Figura 26 y 28, incrementan las cargas verticales por impacto de las ruedas sobre el riel; lo cual exagera el deterioro de la vía y del material rodante. Existe el peligro que alguna de las

fisuras subsuperficiales comience a crecer hacia abajo convirtiéndose en un defecto transversal plano, similar al de la Figura 25; con la posibilidad de que resulte en la falla completa del riel si no se detecta a tiempo, como se muestra en la Figura 29. En menor medida las fisuras pueden ramificarse hacia la superficie y producir descamaciones, Figura 26 (b) y Figuras 28 (b) y (c).

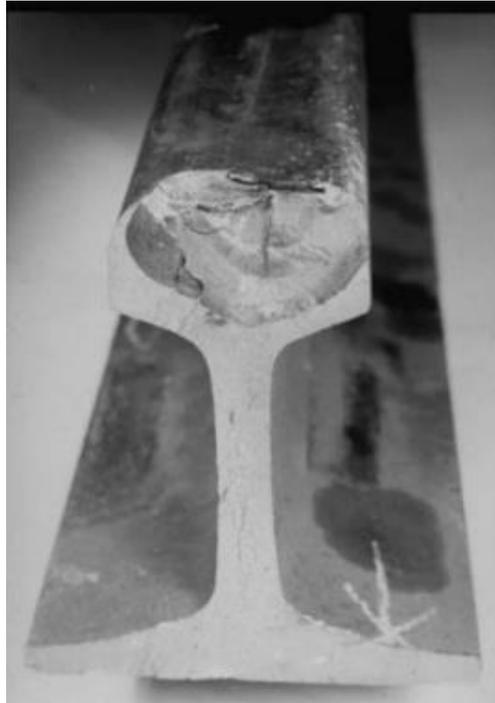


Figura 29. Rotura de un riel resultante de la propagación de una fisura de squats, [21].

4.1.3 Shelling (descascarillado o shells)

Este tipo de daño también se conoce como descascarillado o “shells”. Se pueden considerar defectos sub-superficiales: las fisuras se inician y comienzan a propagarse en capas sub-superficiales endurecidas por deformación a profundidades entre 2 y 8 mm en la esquina de trocha, generalmente, en el riel externo de curvas, [23]; pero no aparecen de manera regular y con un patrón repetitivo como los head checks. En su etapa inicial, el descascarillado se identifica como manchas oscuras en la zona de la esquina de trocha (similares a los squats), Figura 30 (a) y Figura 19 (a). Las fisuras se desarrollan en planos horizontales y/o longitudinales, consistentes con la forma del riel en la esquina de trocha. Esas fisuras iniciales pueden continuar su crecimiento en una dirección longitudinal, sobre el plano en que se inició, con un ángulo entre 10° y 30° con respecto a la superficie del riel y luego producir un desprendimiento (descascarillado), Figura 30 (b), [13] y Figura 19 (b) a (d), línea Sarmiento (Haedo, Argentina); o girar hacia abajo para formar un defecto transversal el cual puede seguir creciendo en un plano transversal, y si no se detecta a tiempo puede llevar a la rotura del riel, Figura 31, [13]. Normalmente el crecimiento, de las fracturas por shelling,

es lento hasta que el defecto alcanza el 15%. El crecimiento entre el 20% y 60% es algunas veces rápido o repentino, se produce justo antes de completar la falla.

El origen es usualmente una grieta longitudinal o una raya cerca de la superficie de rodadura en el lado de trocha (o del lado de campo si el riel ha sido girado). La separación avanza longitudinalmente (no como una verdadera fisura horizontal), en un ángulo relacionado con la cantidad de desgaste en la esquina de trocha. Entonces la fisura gira hacia abajo y hacia adentro para formar una separación transversal. Con frecuencia la separación longitudinal y la raya/grieta donde se origina no son visibles, hasta que se produce alguna pérdida de material o aplanadura.

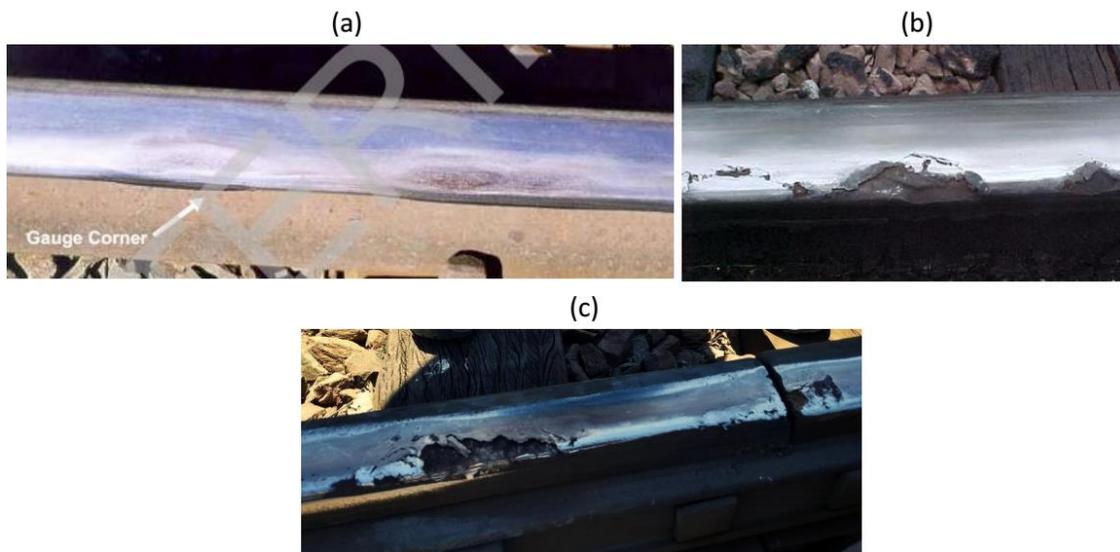


Figura 30. (a) Shelling en estado incipiente (manchas oscuras) (gauge corner: esquina de trocha), [23]. (b) y (c) descascarillados producido por shelling: (b) [13], (c) línea Sarmiento cercanía estación Haedo.



Figura 31. Detalle de fractura originada en un shell de la esquina de trocha, [13].

Como ya se mencionó, tanto los defectos HC como el shelling son producidos por las elevadas tensiones de corte que se desarrollan en la interfaz rueda/riel, cuando esas tensiones superan los límites mecánicos del material del riel. La diferencia en la forma en que se inician los HC (defectos superficiales) y el shelling (defectos sub-superficiales) está, principalmente, en la *influencia del coeficiente de tracción en el esfuerzo de corte* resultante en el riel (el coeficiente de tracción es la razón entre las fuerzas tangenciales y las normales, T/N, [23]). Según [23] para valores bajos de T/N (hasta 0.2) el mayor esfuerzo de corte se obtiene a cierta profundidad desde la superficie del riel, la cual corresponde a la región en la que se generalmente se inicia el shelling. Cargas mayores sobre los ejes aumentan las fuerzas normales y, por lo tanto, favorecen al desarrollo del shelling (descascarillado). Por otro lado, los valores más elevados de T/N que se producen en curvas relativamente cerradas (debido a las fuerzas tangenciales que ejercen el conjunto rueda-eje sobre el riel) o en curvas relativamente abiertas o en vías tangentes (debido a la dinámica adversa del vehículo, tal como el movimiento de serpenteo) incrementan la resultante máxima del esfuerzo de corte lo cual hace que la máxima tensión de corte en el riel se alcance cerca de la superficie, donde se inician los HC. Para una discusión más profunda de las causas de estos defectos referirse a [23].

✓ **END para los defectos de FCR**

Detección:

Cuando cualquiera de los daños producidos por FCR se ha propagado hacia el interior del riel (es decir cuándo se pueden considerar como defectos volumétricos o planos), podrá ser detectado y evaluado por US empleando transductores con haces a 70°. Si se propaga como una fractura compuesta, también existe posibilidad de detectarlo con un transductor de 0°.

Desde su estado incipiente se pueden detectar por CI. Estos defectos se inician como superficiales o subsuperficiales. Si no hay pérdidas considerables de material, estas características las conservan por más que el defecto se propague hacia el interior del riel, es decir que por CI también se puede evaluar el crecimiento desde su comienzo.

4.2 Quemaduras de ruedas (*wheel or engine burns*)

Estos defectos se originan cuando una rueda de locomotora que desliza calienta una porción de la superficie del riel y se enfría rápidamente; formando fisuras de origen térmicas Figura 32 (a). La formación de estas fisuras se asocia a un cambio en la microestructura de la superficie del riel: se forma martensita por el enfriado rápido de la superficie del riel calentada por la rueda; en casos severos el daño se puede extender a profundidades de 4-6 mm de la superficie de la superficie de rodadura. La martensita es más dura, pero a la vez más frágil que la perlita (si consideramos la microestructura de los rieles más comunes).

El impacto de las ruedas sobre las áreas afectadas comienza una pequeña separación horizontal del metal quemado del resto del metal del riel, desarrollando una aplanadura. La propagación transversal del defecto puede empezar desde una fisura térmica en la región de quemado en cualquier momento; y la magnitud de esta propagación no puede ser evaluada a simple vista. El crecimiento es normalmente lento hasta el tamaño de 10-15% de la sección transversal del riel. Luego el crecimiento es rápido.

Las quemaduras pequeñas son similares, en apariencia, a squats pequeños, comparar la Figura 32 (b) con la Figura 26 (a). No obstante, a diferencia de los squats que pueden aparecer en un solo riel en ubicaciones discretas, las quemaduras de ruedas siempre ocurren en pares directamente opuestos entre ellos en los dos rieles.

La Figura 33 muestra la apariencia general de una quemadura de severidad mediana; la Figura 34 es una quemadura de severidad alta; mientras que en la Figura 35 se tienen quemaduras múltiples, estas ocurren cuando más de una rueda motriz deslizan juntas.

Las quemaduras de ruedas pueden ocurrir, también, cuando la locomotora está en movimiento. En este caso, la región dañada se puede extender sobre una longitud del riel considerable, Figura 36.

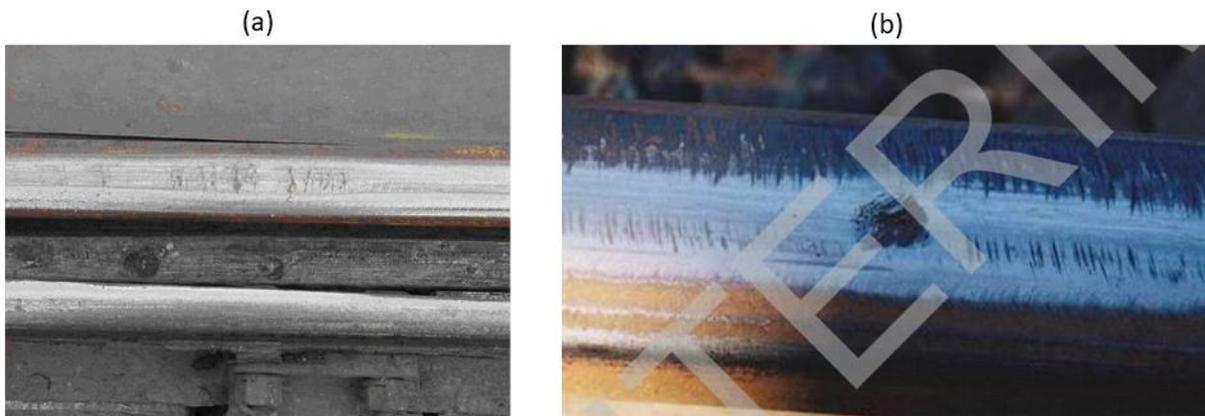


Figura 32. Quemadura pequeña, [3].



Figura 33. Quemadura mediana, [3].



Figura 34. Quemadura grande, [3].



Figura 35. Quemaduras múltiples, [3].



Figura 36. Quemaduras producidas por el deslizamiento de rueda de locomotora en movimiento, [3].

En la Figura 37 se muestran dos detalles de fractura por quemadura de locomotora. Una fractura de este tipo presenta una superficie quemada. La separación transversal, generalmente, no tiene núcleo y puede extenderse en cualquiera de los tres planos. Muchas veces, la presencia de la separación transversal no es visible hasta que el defecto alcanza la superficie del riel (aparecen grietas superficiales o aparece la separación horizontal). La separación horizontal del material del riel comienza en la superficie de rodadura y se prolonga hacia abajo (separación transversal). Como ya se dijo, esas indicaciones superficiales no son representativas del posible desarrollo del daño transversal y si no se evalúa a tiempo se produce la rotura vertical completa del riel, Figura 38.

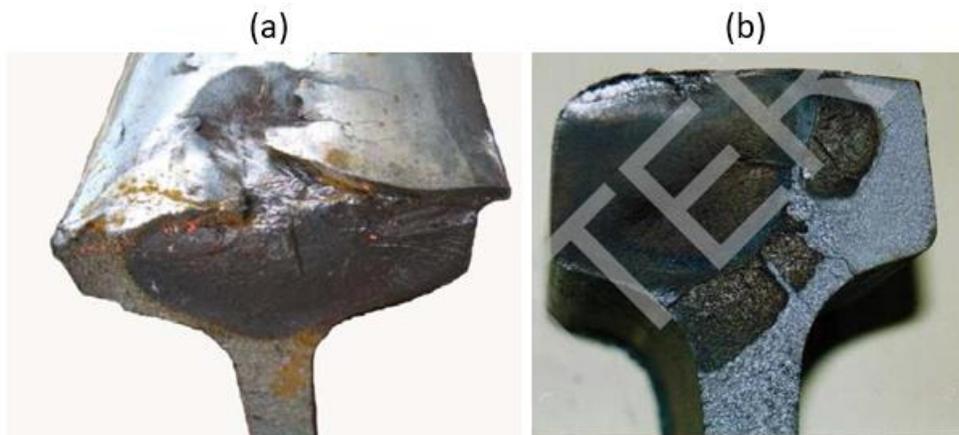


Figura 37. Detalles de fractura por quemadura de locomotora, [3] y [4].

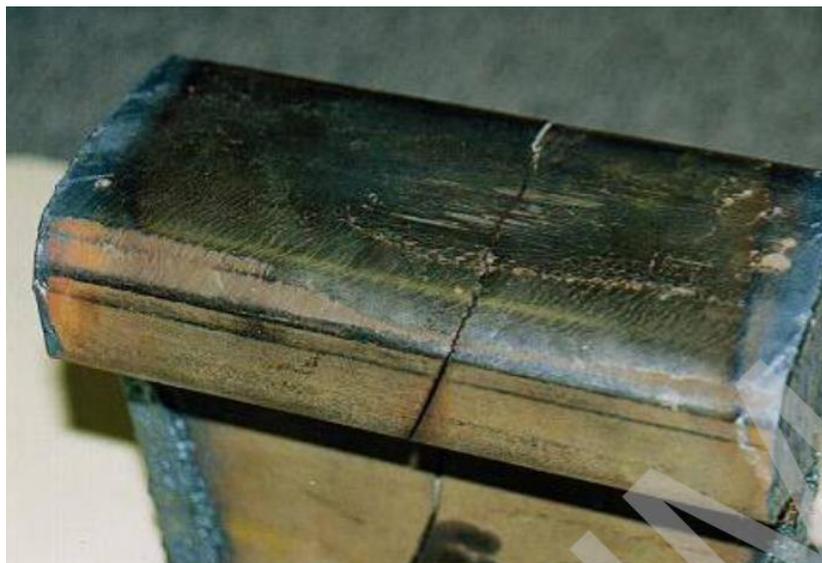


Figura 38. Fractura transversal por quemadura de locomotora, [3].

Los principales factores que aumentan el deslizamiento de las ruedas son:

- (i) Rieles excesivamente duros.
- (ii) Malos procedimientos de conducción de trenes, como la rápida aceleración.
- (iii) Locomotora con potencia insuficiente.

(iv) Contaminación de la superficie de rodadura con sustancias lubricantes, Figura 39, que puedan reducir la fricción a niveles no deseados. También se puede dar una pérdida de tracción cuando se producen lluvias leves luego de períodos de sequía y calor; esas lluvias leves pueden formar un film lubricante sobre contaminantes depositados sobre los rieles, como polen, aceites, grasas o combustibles. Lluvias más fuertes, limpian la superficie del riel y restauran los valores de fricción deseados.



Figura 38. Superficie de rodadura contaminada con sustancias lubricantes, [3].

✓ **END para los defectos de quemadura**

Detección:

Las quemaduras de riel se pueden detectar mediante inspección visual.

Cuando tienen cierto grado de propagación hacia el interior del riel (y pasan a ser defectos volumétricos o planares), las fracturas por quemado se pueden detectar a través del método de ultrasonidos con transductores con haces a 70° , o con transductores de 0° si la fractura se desarrolla como compuesta.

Desde su estado incipiente (como defectos superficiales o subsuperficiales) se pueden detectar por CI.

4.3 Defectos de fabricación, transporte, almacenamiento, montaje y mantenimiento

Aquí incluiremos los defectos que se originan durante el proceso de fabricación de los rieles, y también, los que se pueden originar en el transporte, almacenamiento, montaje y mantenimiento. Es, decir, en este capítulo trataremos algunos de los defectos que no se originan con el tráfico ni por operaciones de mantenimiento. No se tratarán los defectos en soldaduras aquí, que en realidad se pueden considerar como defectos de montaje y mantenimiento; sino que se los considera en la sección de otros defectos.

Los defectos de fábrica, más comunes, son: deformaciones, cavidades (o poros), inclusiones (frágiles y dúctiles), segregaciones, grietas (o fisuras, de diferente tamaño; aquí se cuentan las fisuras térmicas) o material extraño que se encuentra en la cabeza, alma o patín del riel. Los defectos internos de fábrica (poros e inclusiones) constituían los defectos más comunes de los viejos rieles; las mejoras en los métodos de producción de acero y de fabricación de rieles los han hecho mucho menos frecuentes. Los defectos internos de fabricación ocurren cuando durante la colada del acero quedan incluidas escorias, gases o material extraño. Si existen salpicaduras de metal, estas pueden enfriarse y oxidarse antes de que se fundan con el metal líquido, originando defectos externos. También, enfriamientos defectuosos pueden ocasionar deformaciones del riel.

Las *inclusiones frágiles* más comunes son óxidos y silicatos. Las *inclusiones dúctiles* son compuestos de S y P. Las inclusiones de sulfuro de manganeso (MnS) son las inclusiones más comunes encontradas en los aceros y se deforman de manera creciente cuando la temperatura disminuye. Este tipo de inclusiones puede producir fractura dúctil. Durante la deformación o el conformado las inclusiones de MnS tienen una marcada influencia en la ductilidad del producto final.

Los defectos externos, más comunes, que pueden originarse en el transporte, almacenamiento y colocación, son: golpes, hendiduras, astillas, etc.

Cualquiera de los defectos mencionados puede originar fisuras u otros puntos de concentración de tensiones.

Crecimiento: Aunque los defectos de fábrica no crecen como tales, pueden proveer puntos de origen para una separación transversal (Figura 13) o longitudinal. Posteriores desarrollos dependen del tipo de defecto de fábrica, ubicación en el riel y cargas sobre este.

4.3.1 Defectos transversales

En la Figura 13, se muestra como una inclusión frágil en el acero del riel causó una fractura transversal; a través de un proceso de fatiga como ya se describió. A través del mismo proceso de fatiga, la propagación de un poro causó la fractura transversal de la **Figura 39**.

Cuando la propagación de la fractura es transversal, el crecimiento de este tipo de defectos es normalmente lento hasta que el defecto alcanza el 20-25%. Después de que se alcanza el 25%, el crecimiento es rápido. Hay que tener en cuenta que estos porcentajes son muy relativos y dependen mucho de las cargas que recibe el rail y del tráfico.



Figura 39. Detalle de fractura iniciada en un poro.

La propagación de un defecto interno de fabricación también puede producir una fractura compuesta, como la de la Figura 15. En este tipo de fractura, el crecimiento es normalmente lento hasta que el defecto alcanza el 30-35%. Si la separación horizontal es suficientemente severa para alcanzar la superficie y causar aplanaduras en la superficie de rodadura, el crecimiento es rápido.

La expansión y ruptura de inclusiones dúctiles o la ruptura de inclusiones frágiles, pueden dejar cavidades alargadas o peligrosas en el costado de la superficie de rodadura de la cabeza del riel.

4.3.2 Decoloración

Una **decoloración** es una oxidación rojo o púrpura alrededor de un defecto. Esta decoloración se produce por la corrosión interna y se conoce como **sangrado**. El sangrado se puede presentar cuando un defecto interno se propagó llegando a la superficie del riel, o en cualquier defecto externo. *Por lo tanto, un sangrado siempre es una indicación relevante.* El sangrado se introduce aquí, para los defectos tratados en este capítulo; pero la propagación de un defecto de quemado o la presencia de uno producido por FCR también puede producirlo. Por ejemplo, el estado previo al descascarillado producido por shelling (o el shelling mismo, Figuras 30 y 31) puede presentar suaves decoloraciones en el lado de trocha sobre la superficie de rodadura o al costado del riel. Si el riel ha sido transpuesto, el descascarillado aparece en el lado de campo. Los motivos de introducir aquí el sangrado son dos: *por un lado*, los defectos de FCR y quemaduras tienen otras particularidades que

permiten identificarlos; *por otro*, en el caso de los defectos tratados en este capítulo, el sangrado puede indicar una propagación de proporciones considerables.

✓ **END**

Detección:

Los defectos de fábrica superficiales se pueden detectar mediante inspección visual.

Cuando el defecto iniciador se ha propagado transversalmente, los defectos internos se pueden detectar por US mediante transductores con haces a 70°, tanto para fracturas transversales como compuestas. Si se desarrollan como fracturas compuestas también existe la posibilidad de detectarlos con haces a 0°.

4.3.3 Defectos longitudinales

Un defecto longitudinal es cualquier fractura progresiva la cual tiene solo una separación longitudinal. Aquí se describirán los dos defectos longitudinales más comunes que tienen origen en propagación de defectos de fabricación, transporte, almacenamiento y montaje que son: **separación horizontal de la cabeza** y **ruptura vertical de la cabeza**. También se presentarán dos defectos menos comunes que son: la **cavidad en el riel** y la **separación del alma**. Más adelante se tratará el otro defecto longitudinal bastante común que es la ruptura de corte o cizallamiento; la cual es causada por el tráfico.

(a) Separación horizontal de la cabeza

Una separación horizontal de la cabeza es una fractura longitudinal progresiva que se origina dentro de la cabeza del riel, generalmente ubicada a 6 mm por debajo, o más, de la superficie de rodadura y avanza horizontalmente en todas las direcciones. Usualmente viene acompañada por aplanaduras sobre la superficie de rodadura. El defecto se asemeja a una fisura longitudinal cuando este alcanza la superficie de la cabeza del riel. No se debe confundir con un squat.

El **origen** es una grieta longitudinal interna provocada por segregación o inclusiones que provienen del proceso de manufactura. La ruptura avanza longitudinal y horizontalmente paralela a la superficie de rodadura.

El impacto de las ruedas puede iniciar una ruptura transversal; en estos casos, el defecto se clasifica como una fisura compuesta. Una ruptura horizontal puede estar presente en varios lugares dentro de la misma sección del riel.

La Figura 40 muestra el detalle de fractura de una separación horizontal de la cabeza. En la Figura 41 se tiene la indicación de una separación horizontal de la cabeza, antes de producirse la ruptura. Esa delgada fisura puede aparecer de uno o ambos lados del riel a una profundidad de al menos 6 mm, o al menos 1/3 del camino por debajo de la parte superior de

la cabeza. En esta etapa puede producirse sangrado o una aplanadura en la banda de rodadura y/o en alguna de las esquinas del riel; acompañada por un ligero ensanchamiento o una caída de la cabeza.

El **crecimiento** es generalmente rápido para la longitud de separación longitudinal interna, pero se puede detener por completo. *La fisura horizontal también puede curvarse hacia abajo y empezar una fisura transversal. Las cargas de impacto pueden iniciar la ruptura transversal, cambiando la clasificación del defecto a una fisura compuesta.* Como en otros defectos, pueden presentarse varios en un mismo tramo de riel.

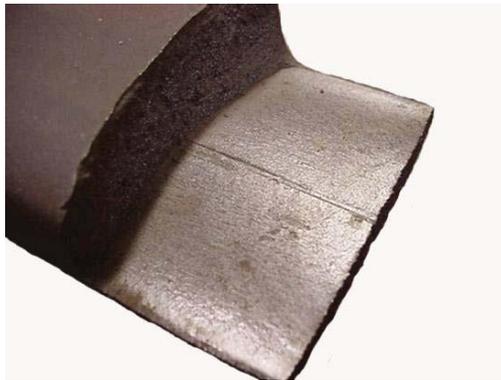


Figura 40. Ruptura horizontal de la cabeza que se origina a partir de un defecto interno.



Figura 41. Vista lateral de la ruptura horizontal de la cabeza.

✓ **END**

Detección:

La separación horizontal de la cabeza se puede detectar mediante ultrasonido con transductores a 0 y 45°.

Las aplanaduras y grietas laterales se detectan por inspección visual.

(b) Ruptura vertical de la cabeza

Una separación vertical de la cabeza (VSH por sus siglas en inglés – Vertical Split Head) es una fractura longitudinal progresiva a través o cerca de la mitad de la cabeza, que se extiende en o a través de esta. Puede mostrar una fisura o una veta de óxido debajo de la cabeza, cerca del alma; o las piezas se pueden separar del costado de la cabeza.

El **origen** es una grieta longitudinal interna producida por la propagación de una segregación o inclusión que proviene del proceso de manufactura. La ruptura avanza longitudinal y horizontalmente, paralela al costado de la cabeza; luego puede girar gradualmente hacia el lado de trocha o hacia el lado de campo de la cabeza. En algunas ocasiones uno de los extremos de la VSH gira hacia el lado de trocha con el otro extremo girando hacia el lado de campo.

El **crecimiento** es comúnmente rápido después de que la grieta o separación se abre. Esta continúa su crecimiento rápidamente hasta que la ruptura resulta hacia el exterior.

Usualmente no es visible desde la superficie, hasta que el crecimiento tiene una longitud de varios centímetros.

Si la ruptura es en el lado de trocha del riel y la ruptura se produce durante el servicio, las ruedas del vagón tendrán una tendencia a subir a la parte superior del riel o caer hacia la trocha, causando un descarrilamiento. En caso de falla en servicio el riel puede romperse en varias piezas.

En la Figura 42 (a), (b), (c) y (d) se tienen diferentes separaciones verticales de la cabeza. En (b) ya se produjo la fractura; (a) y (d) se clasifican como defectos grandes; mientras de (c) es un defecto medio.

Antes que se produzca la ruptura o separación de alguna parte del riel ((a), (c) y (d)), pueden aparecer:

(i) Una banda oscura sobre la superficie de rodadura, similar a una aplanadura, Figura 42 (g).

(ii) El ensanchamiento de la cabeza; y el lado de la cabeza donde la separación esta desplazada puede mostrar signos de hundimiento o caída, Figura 42 (f).

(iii) La caída de la cabeza puede causar la aparición de una banda de óxido en la zona de empalme cabeza/alma. En etapas avanzadas, es evidente un sangrado de la fisura en la zona de empalme, Figura 42 (e).

✓ END

Detección:

La separación vertical de la cabeza se puede detectar y evaluar mediante ultrasonido con transductores a 0 y 45°.

Según el estadio del defecto se puede detectar por inspección visual.



Figura 42. Separación vertical de la cabeza. (a) y (d) [3] defectos grandes; (c) [3] defecto medio; (b) [3] fractura; (e) [4] fisura entre la cabeza y el alma con sanfrgado; (f) [3] ensanchamiento de la banda de rodadura; (g) [4] descoloración oscura en la zona de defecto.

(c) Cavidad en el riel (piped rail)

La cavidad en el riel es una fractura longitudinal progresiva, (división vertical) en el alma del riel, con una separación vertical o grieta que se abre en una cavidad en etapas avanzadas de desarrollo. La longitud de los defectos puede variar desde unos cuantos centímetros hasta la sección completa del riel, ver Figura 43.

El **origen** es una amplia grieta longitudinal o una cavidad interna oxidada dentro del alma que viene del proceso de manufactura (cuando el lingote o el tocho fueron fundidos). No se deben confundir con segregaciones no metálicas donde las superficies de la cavidad no están oxidadas. Una vez que empieza el desarrollo, la grieta se propaga verticalmente hacia la cabeza y el patín. En rieles modernos, fabricados bajo el proceso de colada continua, este tipo de defecto es muy pocas veces encontrado en etapas avanzadas.

La grieta original usualmente no crece vertical u horizontalmente. Sin embargo, eventualmente, pesadas cargas axiales pueden causar que se propague o se abra en dirección de la sección transversal, causando una protuberancia en el alma que se parece a un tubo (de aquí su nombre en inglés: pipe), Figura 43. Estas grietas internas, las cuales puede causar poco o ningún problema bajo condiciones de tráfico normal, se pueden abrir cuando están sujetas a las presiones por soldadura a tope.

Las cavidades en rieles son peligrosas debido a: (i) el riel queda debilitado en la distancia de la cavidad; (ii) la cabeza no queda soportada apropiadamente por el alma donde existe la cavidad; (iii) durante la falla en servicio, el riel puede romper en varias piezas.

Las cavidades en rieles muestran las siguientes características: (i) Abombamiento del alma en ambos lados. (ii) Un ligero hundimiento de la cabeza del riel en la zona por encima de la cavidad.



Figura 43. Abombamiento del alma por presencia de una cavidad.

✓ **END**

Detección:

La cavidad del riel se puede detectar y evaluar mediante ultrasonido con transductores a 0 y 45°.

El abombamiento del riel o el hundimiento de la cabeza se pueden detectar por inspección visual.

(d) Separación del alma

La separación del alma es una fisura progresiva longitudinal a lo largo del costado del alma que se extiende hacia o a través de esta.

El **origen** es una grieta en el alma o daño en el alma, en ubicaciones donde están grabados los números de colada en el alma. La ruptura del alma **también se puede desarrollar** como resultado de altas tensiones residuales de los procesos de enderezamiento por rodillos, soldadura del riel y en aplicaciones de uniones.

El **crecimiento** de este tipo de defectos suele ser rápido después de que la fisura se extiende a través del alma y es acelerado por cargas axiales desiguales o cargas axiales pesadas.

La separación del alma es peligrosa debido a que:

- (i) El riel queda debilitado en la distancia que ocurre la separación.
- (ii) Durante la falla en servicio el riel puede romperse en varias partes.

Antes de llegar a la ruptura, Figura 44 (a), la separación del alma muestra grietas de sangrado color herrumbre a lo largo del desarrollo de la fisura en el alma, Figura 44 (b); las cuales puede ser horizontal, vertical o una combinación de ambas. También, una fisura o veta de óxido puede aparecer bajo la cabeza cerca del alma o las piezas se pueden romper a un costado de la cabeza.

✓ **END**

Detección:

La ruptura del alma se puede detectar mediante ultrasonido con transductores a 0 y 45°.

Las indicaciones previas a la rotura (grietas, sangrado, betas de óxido) se detectan por inspección visual.

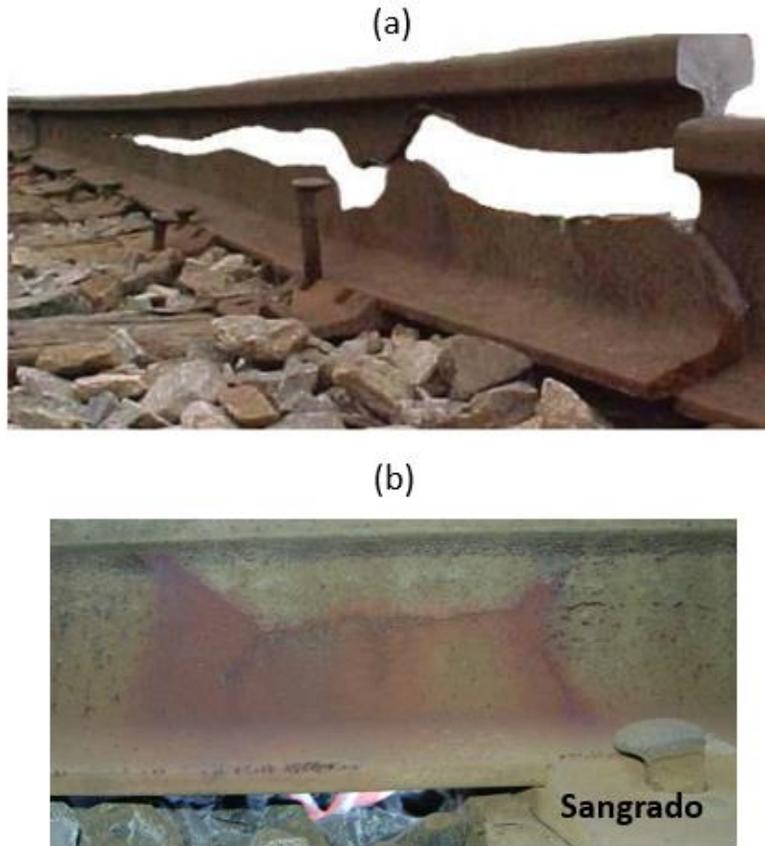


Figura 44. (a) Falla del alma resultado de altas tensiones residuales. (b) Sangrado en fisura previa a separación del alma.

4.3.4 Fisuras en agujeros de pernos

Una fisura en agujeros de perno es una grieta a través del alma, que **se origina** en un orificio de perno y progresa en un camino inclinado hacia la cabeza del riel o inclinado hacia abajo, hacia el patín. Generalmente viene acompañado por aplanaduras sobre la superficie de rodadura. Las grietas de orificio de perno completamente desarrolladas pueden continuar horizontalmente a lo largo de la cabeza/alma o del patín/alma, o pueden progresar hacia y a través de la cabeza o el patín para separar una parte del riel.

La fisura de la Figura 45 (a) fue originada en un agujero de perno; en la Figura 45 (b) se muestra un patrón para inspección por ultrasonido de fisuras en agujeros de perno.

Origen: Una fisura de agujero de perno es normalmente el resultado de un esfuerzo inusual a lo largo del borde del agujero del propio perno. Estos esfuerzos pueden ser causados por las eclisas o por las juntas de bombeo, Figura 46; perforado inapropiado; excesivo desgaste en las eclisas; o impactos anormales en los extremos del riel causados por el material rodante. Los puntos de origen pueden ser esfuerzos de contacto entre el riel y el perno o en una rebaba en el borde del agujero dejada durante la operación de perforado.

Comparado con los defectos transversales, su **crecimiento** es errático. Estos defectos rompen con frecuencia a partir de un defecto muy pequeño cuando el extremo del riel se somete a esfuerzos de carácter inusual.

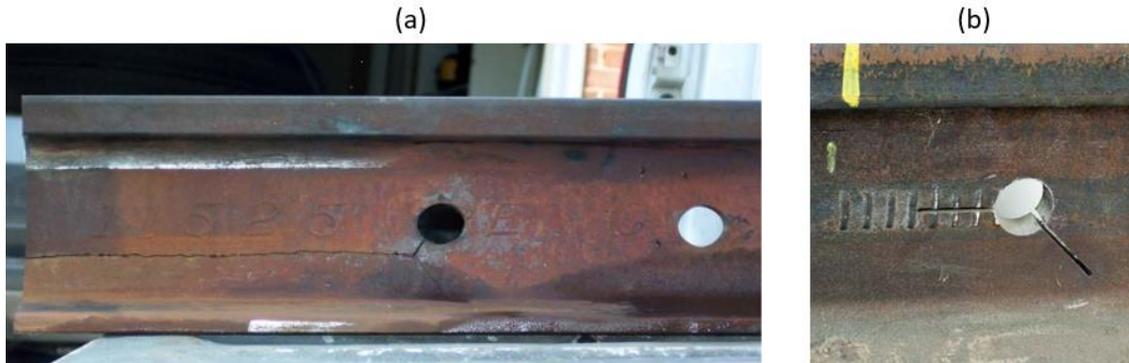


Figura 45. Patrón para la inspección de fisura en agujero de perno.



Figura 46. Tensionado hidráulico de rieles para ajustar la apertura entre los rieles.

Una fisura de agujero de perno es peligrosa debido a que: (i) el riel queda debilitado en la distancia de separación y (ii) durante la falla en servicio, el riel puede romperse en varias partes, convirtiéndose de este modo en un riesgo grave de descarrilamiento.

Las fisuras de agujeros de pernos, generalmente, no son visibles hasta que se remueven los pernos o las eclisas; al menos que el defecto haya avanzado por encima de la eclisa (hasta la cabeza) o por debajo de la eclisa (hasta el patín). Una vez que se remueve la junta, el defecto puede ser reconocido mediante una delgada fisura que se extiende desde el agujero del perno por la longitud del defecto.

✓ **END para fisuras en agujeros de perno**

Detección:

Los defectos de agujero de perno se pueden detectar mediante ultrasonido con transductores a 0° , 37° o 45° , cuando ya tienen una propagación considerable..

Por CI se pueden evaluar en su estado incipiente.

4.4 Otros defectos

4.4.1 Fractura inversa

La fractura inversa es una fractura progresiva, que comienza en la esquina inferior o en la parte lateral del lado de trocha de la cabeza del carril, extendiéndose transversalmente a través de la cabeza del riel. Es decir, no comienza en la esquina de trocha ni en el interior del riel.

El **origen** es un concentrador de tensión asociado con una condición de entalla en borde laminado en frío ubicado en la esquina inferior de la cabeza del riel. Típicamente este defecto se asocia con *severos desgastes del riel y altas cargas axiales*.

El **crecimiento** es normal hasta que el defecto alcanza el 10%. Después del 10%, el crecimiento es rápido o repentino, previo a completar la falla de la sección transversal.

La fractura inversa es peligrosa debido a que: puede ocurrir en varios lugares del mismo riel (donde se registran condiciones análogas de desgaste y tensiones); la falla en servicio es usualmente una ruptura completa del riel a través de la cabeza, alma y patín; la falla puede ocurrir antes de llegar a propagarse más del 15 %. La Figura 47 es el detalle de una fractura inversa; donde está bien claro el inicio del defecto en la zona lateral del riel. El inicio de la fractura de la Figura 47 se debió a la conjugación de desgaste más cargas laterales intensas. El detalle de una fractura inversa muestra una separación transversal la cual empieza en la parte baja de la esquina de trocha y se propaga en forma de aros concéntricos difundiéndose desde el punto de origen. Es peligrosa como cualquier otra fractura transversal

✓ END para la fractura inversa

Detección:

El detalle de fractura inversa se puede detectar y evaluar mediante el método de ultrasonidos con el uso de transductores con haces a 70°, cuando ya se ha propagado en la sección transversal.

Si aparecen fisuras o sangrado, puede detectarse visualmente. Por la posición y los efectos del desgaste en el lateral del riel, es difícil su detección por CI.



Figura 47. Detalle de fractura inversa.

4.4.2 Ruptura de corte o cizallamiento

Una ruptura por corte es una separación longitudinal de la cabeza del riel que resulta de una pérdida significativa del metal base de la cabeza del riel. Esto resulta en un debilitamiento de la capacidad para soportar cargas.

Una ruptura de corte por lo general no se asocia con condiciones inherentes en el material. En su lugar, este tipo de ruptura **normalmente ocurre cuando las cargas en el riel están desplazadas del eje central**, causando el colapso de la cabeza del riel; y en algunas ocasiones se lo asocia con problemas en la trocha, rieles livianos, desgaste severo del riel (desgaste vertical), o cargas fuera del eje central causadas por material rodante desgastado.

Usualmente el **crecimiento** es repentino. Un precursor del cizallamiento sería la fluencia o deformación en el radio de empalme similar a una cabeza aplastada.

Generalmente no es visible en la superficie hasta que tiene un crecimiento en una longitud de varios centímetros.

Produce el debilitamiento de una porción considerable de la cabeza del riel y en caso de falla en servicio, el riel puede romperse en varias piezas.

Si la ruptura es en lado de trocha del riel y rompe durante el servicio, las ruedas de los vagones tendrán una tendencia a subir a la parte superior del riel o caer hacia el lado de trocha, causando un descarrilamiento.

El aspecto del colapso de la cabeza de un riel por ruptura de corte se muestra en la Figura 48.



Figura 48. Corte o cizallamiento.

Las características visuales son las mismas que en la ruptura vertical de la cabeza (VSH) y cuando se lo descubre se lo clasifica como un defecto VSH; pero en este caso no es debido a un defecto interno de fabricación. Una ruptura por corte muestra lo siguiente:

- (i) Una banda oscura sobre la superficie de rodadura.
- (ii) Ensanchamiento de la cabeza en la longitud de la ruptura. El lado de la cabeza donde la ruptura esta desplazada puede mostrar signos de hundimiento o caída.
- (iii) La caída de la cabeza causa la aparición de una banda de óxido en la zona de empalme cabeza/alma. En etapas avanzadas, puede existir un sangrado de la fisura en la zona de empalme.

✓ **END para la ruptura de corte**

Detección:

La ruptura por corte se puede detectar y evalúan mediante ultrasonido con transductores a 0°, 37° y 45°.

El ensanchamiento, el sangrado y las marcas de óxido, el oscurecimiento de la banda de rodadura y los hundimientos se pueden detectar por inspección visual.

4.4.3 Separación de la cabeza y el alma

La separación de la cabeza y el alma es una fractura progresiva en dirección longitudinal, que separa la cabeza y el alma del riel en el empalme bajo la cabeza. La separación es a lo largo de una grieta que se extiende verticalmente hacia o a través de la cabeza, en o cerca del centro de la cabeza. Una fisura o una veta de óxido puede aparecer bajo la cabeza cerca del alma, o las piezas se pueden separar por el lado de la cabeza. En la Figura 49 se muestra el aspecto del alma separada de la cabeza, vista de arriba.



Figura 49. Separación del alma y la cabeza, mostrando progresión en el alma.

Tiene su **origen** en la acidez de algunos rellenos a base de asfalto usados en los cruces de carreteras. El contacto con esos rellenos puede iniciar la **corrosión por fatiga** donde la cabeza se une con el alma. El tránsito en los cruces de grava, la velocidad excesiva en las

curvas o un inadecuado peralte del riel pueden causar una carga excéntrica sobre la cabeza del riel, favoreciendo las condiciones para la aparición de este defecto.

La falla puede aparecer como una deformación del riel de color óxido en el área de empalme alma/cabeza, un leve agrietamiento horizontal debajo de la cabeza o una zona de empalme rugosa.

Este tipo de defecto también puede desarrollarse en el área de empalme de la cabeza en la unión de los extremos del riel como resultado de las condiciones de esfuerzos extremos creados por las juntas de bombeo hidráulicas, ver Figura 46, o las eclisas.

El **crecimiento** de este tipo de defecto es normalmente rápido una vez que al riel ha sido girado, ya que esto mueve su centro de carga al lado opuesto de la cabeza.

La separación del alma y la cabeza es peligrosa debido a:

- (i) Usualmente se debilita la longitud total del riel.
- (ii) Durante la falla en servicio, el riel puede romperse en varias piezas.

Apariencia: La separación de la cabeza y el alma ocurre normalmente en los cruces de carreteras donde las inspecciones visuales son imposibles. Cuando se puede realizar una inspección, la ruptura muestra lo siguiente:

- (iii) En etapas tempranas, líneas rugosas surgen a lo largo del empalme.
- (iv) A medida que la condición se desarrolla, una pequeña fisura aparece a lo largo del empalme en ambos lados, lo que indica el crecimiento a través del alma. Este avanza longitudinalmente con leves e irregulares giros hacia arriba y hacia abajo.
- (v) En etapas avanzadas, el sangrado de fisuras se extiende hacia abajo desde la separación longitudinal a través del alma y puede extenderse a través del patín.

✓ **END**

Detección:

La separación de la cabeza y el alma se puede detectar y evaluada mediante ultrasonido con transductores a 0°, 37° y 45°.

El sangrado, las deformaciones, los agrietamientos, las zonas rugosas, coloraciones ocres o herrumbre pueden ser detectados por inspección visual.

4.4.4 Separación de la cabeza y el alma en el extremo del riel

Existe otra separación entre la cabeza y el alma que se presenta en los extremos del riel. Es una fractura progresiva, que separa longitudinalmente la cabeza del alma del riel en el área de empalme, Figura 50.

El defecto se **origina** en el área de empalme en el extremo del riel y se cree que es causado por cargas excéntricas de la cabeza del riel y que resulta en una ruptura por fatiga en el punto más débil del extremo del riel.

Generalmente el crecimiento ocurre en etapas graduales, pero puede desarrollarse bastante rápido bajo condiciones extremas de esfuerzos causadas por juntas oscilantes o de bombeo. La longitud hasta la cual esta separación se extiende antes de propagarse hacia arriba en la cabeza es impredecible, pero usualmente girarán hacia arriba entre 75 y 250 mm desde su inicio. La separación del alma y la cabeza en los extremos del riel en ocasiones progresa hacia abajo a través del área del alma y el patín, pero generalmente la falla inicial resulta en el desplazamiento hacia la cabeza del riel.

El riel queda debilitado en gran medida para una distancia que supera la separación progresiva

Apariencia: La separación del alma y de la cabeza muestra una delgada fisura a lo largo del área de empalme, visible una vez que se retiran las juntas o eclisas. Con las juntas en su lugar, la detección visual es imposible hasta que el defecto alcanza una etapa muy avanzada de desarrollo.



Figura 50. Separación del alma y la cabeza en el extremo del riel.

✓ **END**

Detección:

La separación de la cabeza y el alma puede ser detectada mediante el ensayo de ultrasonido con transductores a 0° , 37° o 45° .

Como se mencionó recién, con las eclisas en su lugar es muy difícil su detección por inspección visual.

4.4.5 Defectos en el patín

Un defecto en el patín es una fractura o ruptura que se origina en la base del riel.

En la Figura 51 tenemos un esquema y una fractura en un patín. En este caso, la ruptura del patín es una fractura progresiva en la base del riel, con una división o separación vertical. La ruptura del patín está confinada normalmente al área de la pestaña de la base del riel y usualmente la ruptura en forma ovalada se denomina ruptura de medialuna.

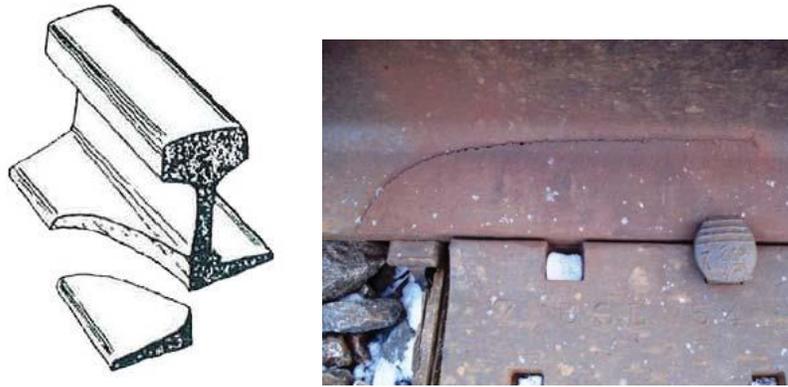


Figura 51. Ruptura medialuna del patín.

El defecto **puede ser causado** por un montaje inapropiado de juntas o placas de asiento; o pueden tener su origen en una grieta, segregación o inclusión de la fabricación.

Usualmente el **crecimiento** depende de la ubicación de la rotura y de las cargas del ferrocarril.

La Figura 52 muestra una fractura progresiva en la base del riel que se desarrolló principalmente en un plano transversal. Estos defectos, generalmente, se originan en el borde exterior del patín. Normalmente estas fracturas son causadas por una hendidura o golpe sobre el borde del patín. Este tipo de daño puede ser causado por una manipulación inapropiada del riel o durante el montaje.

Una ruptura en el patín se considera peligrosa debido a:

- (i) El remanente de la sección transversal del riel queda debilitado.
- (ii) Durante una falla en servicio, el riel puede romperse en varias partes.

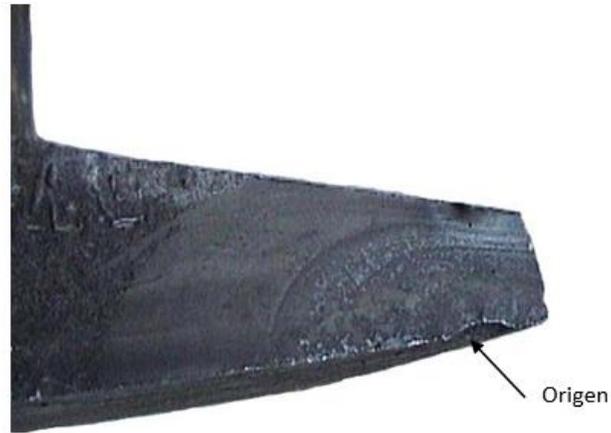


Figura 52. Fractura del patín en la que se muestra un golpe con su desarrollo transversal.

✓ **END para los defectos del patín**

Detección:

Las fisuras en el patín son difíciles de detectar por inspección visual.

El daño se podría evaluar y detectar por US con un palpador de 70°, si se puede acceder al patín fácilmente.

4.4.5 Golpes o hendiduras en el riel

Como su nombre lo indica, este tipo de defecto es un golpe o hendidura sobre la cabeza, alma o patín del riel.

Origen: Los golpes o hendiduras pueden ser causados por aplanaduras o roturas en la rueda; intentos fallidos al martillar las estacas que sirven de fijaciones, por equipos de arrastre o durante la fabricación, estiba y transporte de los rieles nuevos.

El **crecimiento** de este tipo de defectos normalmente depende de la ubicación del golpe sobre el riel y de la carga sobre el mismo.

Apariencia: Los golpes sobre el riel se pueden reconocer mediante la presencia de muescas, cortes o marcas dejadas sobre la superficie del riel.

Los golpes sobre rieles *son peligrosos si las marcas son profundas* o lo suficientemente afiladas como para causar el desarrollo de otro tipo de defectos.

✓ **END**

Detección:

Se detectan por inspección visual

4.4.6 Astillas

Una astilla es una separación de una masa fina y afilada del metal de la superficie de la cabeza, alma o patín.

Origen: Se origina en el proceso de laminación en la fábrica de producción de rieles, cuando una pequeña sección pre-oxidada del riel se traslapa, en lugar de fluir y soldarse bajo la presión de los rodillos. También se puede originar durante los procesos de transporte, almacenamiento y montaje.

Las astillas **son propensas a separarse, en lugar de crecer**. Sin embargo, éstas pueden romperse, causar abolladuras, o generar un punto de origen para una separación.

Las astillas no son consideradas como un defecto grave.

Las astillas muestran las siguientes particularidades:

(i) Finas astillas sobre la superficie de la cabeza y paralelas a la longitud del riel.

(ii) Astillas oscurecidas (estadios avanzados) lucen como una separación vertical de la cabeza, pero sin propagarse de la cabeza.

(iii) Astillas sobre el lado de la cabeza. Estas son más pequeñas y delgadas (pero menor a 6 mm de espesor) que las astillas sobre la superficie de rodadura. Forman parte del contorno del riel, acostadas sobre la superficie. Si una astilla se desprende, solamente queda una hendidura.

✓ **END**

Detección:

Los defectos de astilla se pueden detectar mediante una inspección visual.

4.4.7 Corrosión

La corrosión es el deterioro o la degradación del metal, generalmente sobre el alma o el patín del riel; lo que resulta en picaduras irregulares o cavidades. Estrictamente hablando la separación de la cabeza y el alma descrita en **4.4.3** también es un fenómeno de corrosión.

Normalmente la corrosión ocurre en áreas húmedas o mojadas, tales como túneles o pasos a nivel enterrados. Esencialmente la corrosión es la oxidación del metal.

Crecimiento: El proceso de corrosión usualmente es lento, el cual ocurre sobre un periodo de tiempo extenso. Sin embargo, este proceso puede ser enormemente acelerado mediante acción electrolítica sobre caminos donde la electricidad es el medio primario de fuerza motriz. Además, las tensiones que soporta el riel también pueden acelerar el proceso; llegando incluso a la rotura del riel por fatiga.

La corrosión **es potencialmente riesgosa** debido a que pueden ocurrir fallas a través de la cabeza, alma y patín cuando el área de la sección transversal queda suficientemente

debilitada por la acción corrosiva. Algunas veces los severos impactos provocados por ruedas aplanadas causan rupturas en el riel, si este previamente se encuentra debilitado como causa de la corrosión.

Apariencia: La corrosión se manifiesta mediante picaduras o cavidades sobre la cara superior del patín o en el alma del riel. Los casos de corrosión más severos generalmente ocurren por debajo del patín; en este caso no es visible cuando el riel se encuentra ubicado en la vía. La Figura 53 muestra un ejemplo de corrosión.



Figura 53. Corrosión sobre el riel, sistema de fijación y placas.

✓ **END**

Detección: La corrosión algunas veces puede ser detectada mediante inspección visual, salvo en la base del patín.

4.4.8 Abolladura del riel (rail batter)

La abolladura es un daño significativo que se da en los extremos del riel en juntas defectuosas o en fracturas del riel no reparadas. Se puede describir también como una cara de fractura lisa en un extremo del riel. Los **dos tipos** significativos de abolladuras en el riel son: **abolladura por impacto** y **abolladura por fricción**.

La **abolladura por impacto** resulta a partir de la fractura del riel, o en una unión defectuosa, cuando la superficie queda expuesta al impacto de la rueda. Una abolladura por impacto de las ruedas en una superficie de fractura se muestra en la Figura 54 (a).

La **abolladura por fricción** resulta de la suficiente de separación de la sección del riel que permite que las dos caras de fractura, o de una unión defectuosa, hagan contacto bajo la acción de una carga, Figura 54 (b).

Ambos casos pueden borrar la zona de encuentro de las caras de fractura, impidiendo la identificación de condiciones de fatiga sub-superficiales.



Figura 54. (a) abolladura por impacto de las ruedas; (b) abolladura por fricción, [4].

✓ **END**

Detección: Se detectan por inspección visual.

4.4.9 Corrugaciones del riel

Las corrugaciones del riel son irregularidades cíclicas (ondulatorias), generalmente verticales, en la superficie de rodadura de los rieles (aquí verticales se refiere a las profundidades del daño).

Las corrugaciones son de dos tipos principales:

(a) Paso corto: de aproximadamente 30 mm a 90 mm en longitud de onda, como se ilustra en la Figura 55.

(b) Paso largo: por encima de 300 mm en longitud de onda, aproximadamente, como se ilustra en la Figura 56 (a), 56 (b) y 56 (c).

Las corrugaciones de **paso corto generalmente se desarrollan** bajo operaciones de pasajeros, de carga nominal por eje más ligeras (< 20 toneladas). La profundidad de estas corrugaciones suele ser inferior a 0,2-0,3 mm.

Las corrugaciones de **paso largo generalmente se desarrollan** bajo operaciones de carga mixta o tren unitario de mayor carga nominal por eje (> 20 toneladas). La profundidad de estas corrugaciones puede variar de 0,1 mm a más de 2,0 mm, y puede ser variable como se ilustra en la Figura 6(b).



Figura 55. Corrugaciones de paso corto, [3].

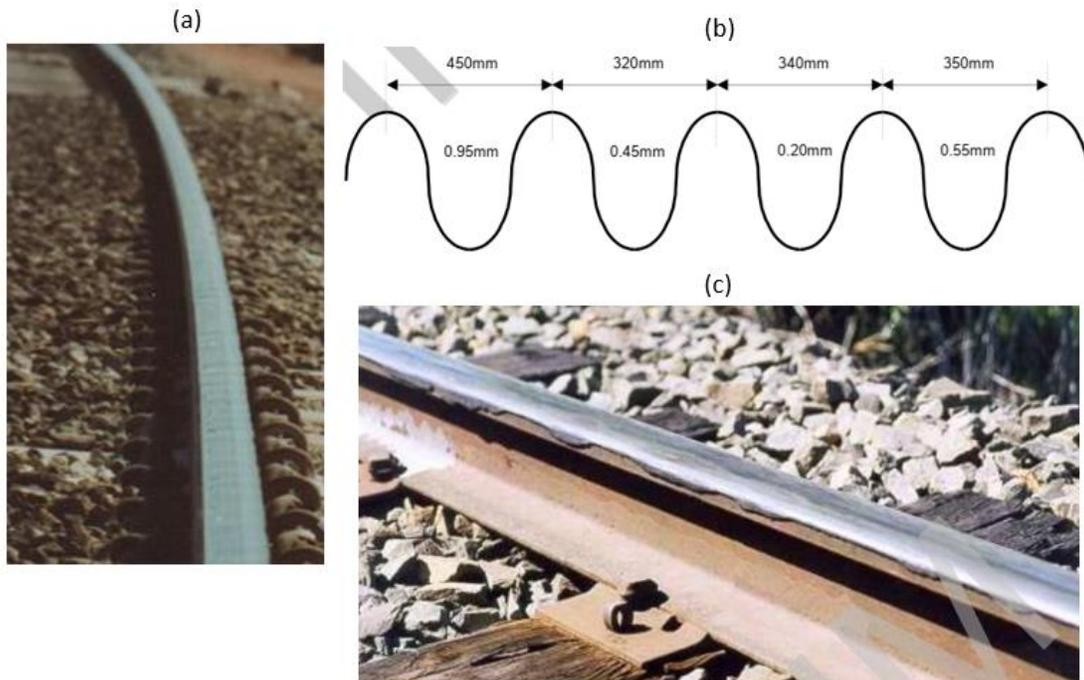


Figura 56. (a) Corrugaciones de paso largo; (b) perfil vertical de una corrugación de paso largo; (c) deformación plástica del riel asociada a una corrugación de paso largo, [3].

Origen: Se cree que las **corrugaciones de paso corto** se forman a partir del desgaste diferencial causado por una acción de deslizamiento longitudinal repetitiva de la rueda sobre el riel, ya sea a través de la aceleración, el frenado o el movimiento lateral a través del riel. Las oscilaciones longitudinales pueden desarrollarse, también, debido a la excitación de la

resonancia torsional del juego de ruedas. Esto puede verse reforzado por el efecto stick-slip⁶ que puede ocurrir en la zona de contacto rueda/riel en curvas cerradas, debido a los diámetros de las ruedas diferenciales en un juego de ruedas sólido.

Las corrugaciones de paso largo, por otro lado, se desarrollan debido al flujo plástico del material del riel (como se ilustra en la Figura 56 (c)), que se debe a tensiones excesivas de contacto rueda/riel y la resonancia vertical combinada de la masa sin suspensión del juego de ruedas y la vía.

Por lo tanto, el fenómeno de corrugación se ve exacerbado por todos aquellos factores que conducen a cargas dinámicas más altas y, por lo tanto, a tensiones de contacto mayores, y al flujo plástico del material ferroviario.

Esos fenómenos que incrementan las tensiones de contacto incluyen: *mayores cargas nominales de ruedas*; *mayores velocidades del vehículo*, que aumentan las cargas dinámicas; *mayores caídas verticales en soldaduras o uniones*, que aumentan las cargas de impacto; *vía más rígidas* (los durmientes de hormigón son mucho más rígidos que los durmientes de madera), que aumentan las cargas dinámicas y de impacto; *suspensiones del bogie más rígidas*, que aumentan las cargas dinámicas y de impacto; *radios de rueda más pequeños*, que aumentan las tensiones de contacto rueda/riel; *mayor fricción/fluencia en el contacto rueda/riel*; *rieles más blandos*, que aumentan la propensión al flujo plástico del material; *mala correspondencia de los perfiles de rueda y riel*, lo que conduce a un contacto estrecho entre la rueda y el riel y, por lo tanto, a mayores tensiones de contacto.

Sin embargo, todavía no es seguro por qué en un riel en particular o incluso en una sección, pueden ocurrir diferentes tipos de corrugación. Algunas posibles razones son: *diferentes tipos de tráfico y características de la suspensión*; *diferentes velocidades de tráfico*; *diferentes grados de riel* y por lo tanto tracción; *diferentes frenadas y aceleraciones*, según el lugar de vía; *diferente geometría de la vía* (radio de curva); *diferentes condiciones de soporte ferroviario* (durmientes de hormigón o madera, soporte continuo).

Las corrugaciones de paso largo a veces se observan en los rieles bajos de las curvas, a veces en los rieles altos, y a veces en ambos. Esto es principalmente una función del peralte de la vía, que puede conducir a la carga de un riel más que del otro.

Las corrugaciones de riel son motivo de preocupación porque aumentan las cargas dinámicas de las ruedas (y la vibración) y, por lo tanto, la tasa de deterioro y falla de varios componentes de la vía y del vehículo; así como también la propagación de cualquier otro defecto.

Las corrugaciones también aumentan considerablemente el ruido entre la rueda y el riel.

✓ **END para los defectos de corrugación**

Detección: Se detectan por inspección visual.

⁶ El efecto “stick-slip” se refiere al movimiento de sacudidas que ocurre cuando dos cuerpos sólidos se deslizan uno contra el otro. Este fenómeno tiene lugar cuando la fricción estática de un cuerpo es significativamente mayor que la fricción deslizando.

4.4.10 Defectos en soldaduras

Las soldaduras defectuosas son soldaduras de campo o de taller que contienen alguna discontinuidad o hueco que individualmente supere el 5% del área de la sección transversal de la cabeza del riel; o el 10% del resto de las partes del riel (orientado en el plano transversal o cerca de este).

Generalmente los defectos son debido a: *falta de penetración del metal de soldadura entre los extremos de los rieles; falta de fusión entre el metal de soldadura y el metal del extremo del riel; escoria, óxido o arena atrapada; fisuras en la zona afectada por el calor; fisuras por contracción o fisuración por fatiga.*

Los defectos de soldadura se pueden originar en la cabeza del riel, alma o patín, y en algunos casos, las fisuras pueden avanzar desde el defecto hacia uno o ambos rieles contiguos. Normalmente el tamaño de los defectos de soldadura se reporta en porcentaje de la sección transversal.

Una soldadura defectuosa es peligrosa debido a que frecuentemente las fallas ocurren antes que el defecto llegue a ser visible y se produzca una ruptura en servicio. Generalmente, es una ruptura completa a través de la cabeza, alma y patín. Una ruptura longitudinal a través del alma algunas veces causará una separación de una porción de la cabeza del riel.

En la Figura [4] se tiene una fractura de soldadura aluminotérmica provocada por escoria atrapada; mientras que la Figura 58 muestra la falla total de una soldadura del mismo tipo por porosidad severa.

El óxido, Figura 59 y 60, la escoria Figura 57 y 61, o la arena atrapada pueden iniciar la propagación del defecto hasta la rotura; un pequeño poro puede producir el mismo efecto de propagación del defecto y debilitamiento de la soldadura. Un defecto puede originarse de un lado de la soldadura y propagarse hacia el otro, hasta producir la rotura en una fractura oblicua, Figura 62.



Figura 57. Falla en una soldadura aluminotérmica iniciada en escoria atrapada.



Figura 58. Soldadura aluminotérmica mostrando porosidad severa.



Figura 59. Falla en una soldadura a tope por flash eléctrico iniciada en óxido atrapado.

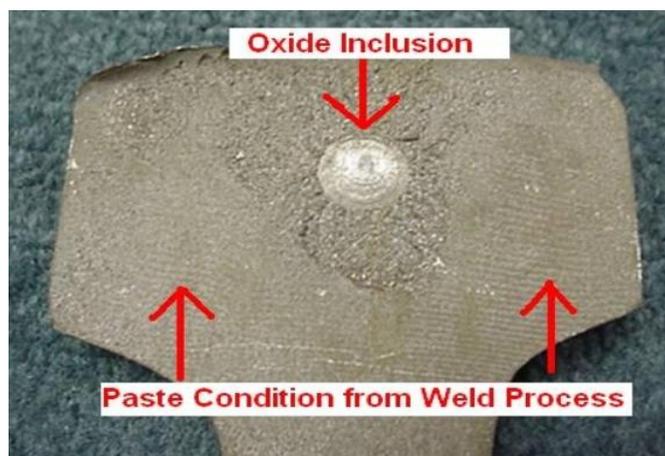


Figura 60. Falla en una soldadura de gas a presión iniciada en una inclusión de óxido que se encontraba dentro de una zona de falta de fusión.

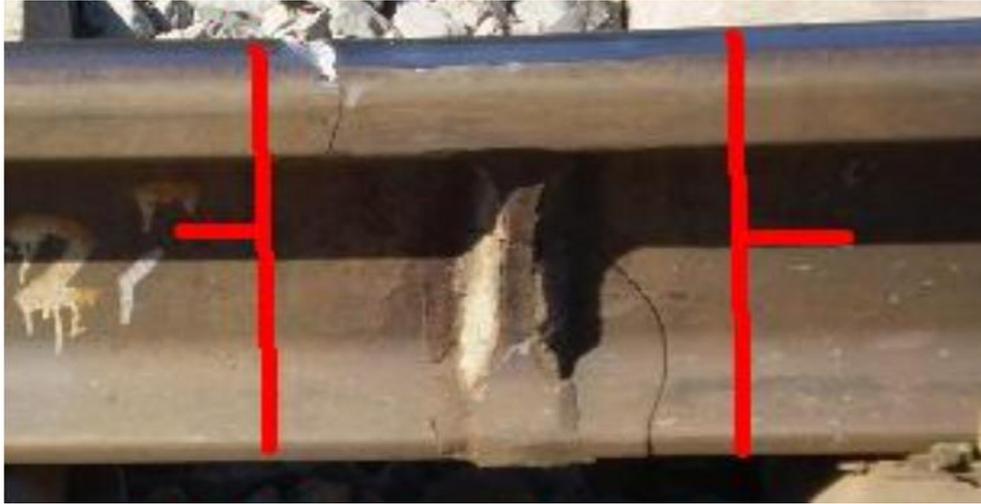


Figure 61. Defecto del tipo oblicuo originado en el alma de una soldadura aluminotérmica.

✓ **END para los defectos en soldaduras**

Detección:

En algunos casos se detectan por inspección visual.

Una soldadura defectuosa se puede detectar mediante ultrasonidos con transductores a 70, 45° y 37°. El US es el método más usado para la evaluación de soldaduras en rieles.

La identificación de soldaduras puede hacerse por corrientes; pero la evaluación de la presencia de algún defecto se hace por US.

4.4.10 Fractura asociada con conexión soldada de cable (para tracción o señalización)

Una falla de una conexión de enlace soldada es un defecto progresivo, generalmente transversal o compuesto, el cual se desarrolla y expande a partir de un punto de soldadura sobre la cabeza del riel, donde un alambre de cobre es adherido mediante soldadura. En la Figura 62 se muestra el detalle de una fractura transversal iniciada a partir de un defecto en una soldadura de cable; y en la Figura 63 se tiene una fisura propagada en dos sentidos, iniciada también en una conexión soldada.

Una conexión de enlace sirve para conectar eléctricamente los rieles en las aberturas que quedan cuando se emplean juntas mecánicas o eclisas, Figura 64.



Figure 62. Defecto transversal desarrollado a partir de una conexión eléctrica.



Figure 63. Desarrollo de un defecto en el alma a partir de una soldadura de cable eléctrico.



Figura 64. Conexiones eléctricas sobre la cabeza de rieles.

Origen: Es dudoso si la causa principal de la falla a partir de un enlace soldado es debida a las fisuras térmicas que se crean mediante un enfriamiento rápido o irregular en o cerca del punto donde el enlace es adherido; o si el punto central del defecto es una reacción metalúrgica que da origen a la formación de martensita por enfriamiento rápido (la penetración resultante en el material base de estas capas de martensita en general se desarrolla entre el enlace soldado y la cabeza del riel).

En general el crecimiento es muy rápido después de que el defecto alcanza un tamaño igual al 10-15% del área de la sección transversal de la cabeza del riel.

Un defecto a partir de una conexión de enlace soldada es peligrosa debido:

- (i) La falla en servicio resulta en una ruptura total a través de la cabeza, alma y patín.
- (ii) El crecimiento es excepcionalmente rápido una vez que el defecto se desarrolla.
- (iii) Por lo general las fallas ocurren antes de que haya evidencia externa de que el defecto está presente.

✓ **END**

Detección:

La fractura detallada (enlace soldado) se puede detectar mediante ultrasonido con transductores a 70, 45° o 37°.

Bibliografía

- [1] Trenes Argentinos Operadora Ferroviaria, “Informe de Gestión – Primer trimestre de 2014”. Disponible en <http://www.sofse.gob.ar/informes/pdf/primer-trimestre.pdf>. Accedido: noviembre 2016.
- [2] <https://www.argentina.gob.ar/transporte/cnrt/estadisticas-ferroviarias>
- [3] Australian Rail Track Corporation; “Rail Defects Handbook - Some Rail Defects, their Characteristics, Causes and Control”, 2006.
- [4] Federal Railroad Administration, U.S. Department of Transportation; “Track Inspector Rail Defect Reference Manual”, 2015.
- [5] Alba Obrutsky, “Introducción a los Ensayos no Destructivos”; Modulo de la Especialización en Ensayos No Destructivos, Instituto de Tecnología Jorge Sabato, UNSAM-CNEA.
- [6] Popović, Z., et al.; 'The Importance of Rail Inspections in the Urban Area -Aspect of Head Checking Rail Defects'. Procedia Engineering, 117: p. 596-608, 2015.
- [7] Szugs, T., et. al. 'Combination of Ultrasonic and Eddy Current Testing with Imaging for Characterization of Rolling Contact Fatigue'. 19th World Conference on Nondestructive Testing. Munich, Germany. 13-17June, 2016.
- [8] Thomas, H-M., et. al. 'Eddy current test method for early detection of rolling contact fatigue (RCF) in rails'. Insight, 52(7): p. 361-365, 2010.
- [9] Flock, Jorge E., 'Inspección de soldaduras de rieles ferroviarios por ultrasonido en Argentina'; SEI, <https://jorgeflock.com.ar/>
- [10] W. D. Callister, Jr and D. G. Rethwisch, “Fundamentals of Materials Science and Engineering - An Integrated Approach”, 4th Ed., John Wiley & Sons, Inc., 2012.
- [11] R. Lewis and U Oloffson, eds, “Wheel-rail interface handbook”. CRC Press, 2009.
- [12] Nordco, “Rail Flaw Defects Identification Handbook”.
<https://www.nordco.com/Nordco.htm>
- [13] Office of Safety - FRA Federal Railroad Administration, USA; 'Track Inspector Rail Defect Reference Manual'. 2015. Accedido: 04/072018. Disponible:
<https://www.fra.dot.gov/eLib/Details/L0353>
- [14] Ph Papaelias, M., Roberts, C., and Davis, C. L.; 'A review on non-destructive evaluation of rails: State-of-the-art and future development'. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 222(4): p. 367-384. 2008.
- [15] FRA Federal Railroad Administration, USA; Magel, E.; 'Rolling contact fatigue: a comprehensive review'. 2011. Accedido: 11/05/2018. Disponible: <https://nparc.nrc-cnrc.gc.ca/eng/view/fulltext/?id=2629e321-fe89-4eda-8531-662d35dbca8a>.

- [16] Popović, Z. and Radović, V.; 'Rolling contact fatigue of rails'; in The III International Scientific and Professional Conference, CORRIDOR 10, A sustainable way of integrations. Belgrade, Serbia. 2016.
- [17] Doherty, A., et al., Why rails crack?, in Ingenia Online. Royal Academy of Engineering: London. p. 23-28. 2005.
- [18] Thomas, H. M., Heckel, T., and Hanspach, G.; 'Advantage of a combined ultrasonic and eddy current examination for railway inspection trains'. *Insight*, 49(6): p. 341-344. 2007.
- [19] Thomas, H. M., Dey, A., and Heyder, R.; 'Eddy current test method for early detection of rolling contact fatigue (RCF) in rails'. *Insight*, 52(7): p. 361-365. 2010.
- [20] Popović, Z., et al.; 'The Importance of Rail Inspections in the Urban Area -Aspect of Head Checking Rail Defects'. *Procedia Engineering*, 117: p. 596-608. 2015.
- [21] Grassie, S. L.; 'Squats and squat-type defects in rails: the understanding to date'. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 226(3): p. 235-242. 2011.
- [22] Dey, A., Thomas, H. M., and Pohl, R.; 'The important role of eddy current testing in railway track maintenance'; in 17th World Conference on Nondestructive Testing. Shanghai, China. 25-28 October 2008.
- [23] ARTC Australian Rail Track Corporation, Australia; 'Rail Defects Handbook: Some Rail Defects, their Characteristics, Causes and Control'. 2006. Accedido: 26/04/2018. Disponible: <https://extranet.artc.com.au/docs/eng/track-civil/guidelines/rail/RC2400.pdf>.
- [24] Grohmann, H. D., Hempelmann, K., and Groß-Thebing, A.; 'A new type of RCF, experimental investigations and theoretical modelling'. *Wear*, 253(1): p. 67-74. 2002.
- [25] Heckel, T., et al.; 'High Speed Non-Destructive Rail Testing with Advanced Ultrasound and Eddy-Current Testing Techniques'; in NDT in Progress 2009, 5th International Workshop of NDT Experts. Prague. 12-14 Oct 2009 2009.
- [26] Pohl, R., Thomas, H. M., and Caspersen, R.; 'Mögliche Fehlerquellen und deren Einflüsse bei der Risstiefenbestimmung mit Wirbelstrom'; in Annual Conference DGZfP (ZfP in Forschung, Entwicklung und Anwendung). Munich. 18-20 May 2009.
- [27] Doherty, A., et al., Why rails crack? in Ingenia Online. Royal Academy of Engineering: London. p. 23-28. 2005.