



Fatiga de contacto por rodadura en rieles

Ingeniería Ferroviaria

Ingeniería Electrónica

Dr. Javier Fava

Ing. Marcelo Gutiérrez

Mag. Ing. Rodrigo Romero

Versión 2018

1. Introducción

La calidad y la seguridad en el transporte ferroviario son temas de preocupación mundial; en el caso particular de nuestro país, hace algunos años el Estado Nacional se propuso renovar y mejorar el sistema ferroviario. Así, surgieron desafíos nuevos para mejorar y/o mantener los parámetros de seguridad del transporte ferroviario. Además, se planteó la preservación del material rodante y la infraestructura en general; tanto de servicios de cargas como de pasajeros. En ese contexto los Ensayos No Destructivos (END), pueden enmarcarse en lo que se denomina mantenimiento predictivo y cumplen un rol fundamental en la detección de fallas de componentes en servicio y en la evaluación del estado general de pre-servicio. Por otro lado, el nuevo material rodante y de infraestructura que se está incorporando necesita de nuevos estándares de mantenimiento e inspección, para lograr el rendimiento máximo de las formaciones y conservar sus parámetros de seguridad en el tiempo. Las fallas e interrupciones en los servicios ferroviarios incurren en demoras, dan lugar a multas por mal desempeño, provocan pérdidas de oportunidades de negocios si se trata del transporte de cargas y ponen en riesgo vidas humanas. En Argentina, desde las décadas pasadas, el control del desgaste y la detección temprana de defectos en rieles y ruedas han dejado de ser relevantes; ya sea, en algunos casos porque las normativas vigentes han quedado obsoletas, en otros casos porque no se aplica la tecnología adecuada para el control, o simplemente porque las formaciones y la infraestructura ferroviarias antiguas han sido diseñadas bajo un criterio de sobre-dimensión y presentan mayor tolerancia al desgaste. No obstante, el mantenimiento de los coches nuevos exige que los controles de la infraestructura y los niveles de desgaste sean cuidadosamente evaluados para garantizar la correcta operatoria. Actualmente, existen diversas propuestas de evaluación no destructiva para los componentes ferroviarios. Sin embargo, hace poco tiempo que esta área ha comenzado a ser explorada localmente de la manera apropiada; tendiendo a lograr un sistema moderno de evaluación de materiales ferroviarios.

2. Importancia de la inspección del daño producido por fatiga de contacto por rodadura en rieles

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 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 (FCR) (rolling contact fatigue (RCF), en inglés) [1] y [2]. Por esta razón, dichos defectos se denominan, en forma general, como defectos de fatiga de contacto por rodadura. 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 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, 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) 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 [3]. 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 [4].

En el contexto de los END en servicio, es un desafío desarrollar técnicas capaces de localizar defectos de forma eficaz y eficiente; eficaz en el sentido de poder evaluar el daño y eficiente en el sentido de poder considerar el desempeño del servicio ferroviario. Por ejemplo, una de las cosas que se busca en las líneas ferroviarias es lograr inspecciones con equipamientos capaces de no interrumpir el servicio o que lo hagan de manera mínima. En la actualidad a nivel local, sólo se emplea el ultrasonido (US) como método no destructivo de detección de defectos en los rieles en servicio; mediante la técnica de carro auscultador (un ejemplo de aplicación en campo se puede encontrar en [5]). Una de las principales limitaciones de esta técnica es la velocidad de inspección, ya que el carro debe ser empujado por una persona. Esta técnica de US convencional se emplea principalmente para la inspección de soldaduras de rieles y para la detección de fisuras que ya hayan penetrado en la cabeza del riel o tengan un desarrollo considerable en el alma o el patín. Es decir, fallas que se pueden clasificar como volumétricas en el sentido que la penetración en el material supera los 5-6 mm, aproximadamente, o que se desarrollen internamente, es decir a profundidades mayores. La detección por US convencional de pequeñas fisuras superficiales menores a 5 mm suele ser una tarea muy difícil (o casi imposible), aún en condiciones de laboratorio y/o velocidades de inspección bajas (5-10 Km/h). Si bien, a nivel internacional, se han desarrollado algunas técnicas ultrasónicas aplicables a alta velocidad (es decir, montadas en un tren de inspección) [6] y [7]; las mismas se optimizan para la detección de fallas volumétricas. Además la velocidad de inspección ultrasónica se encuentra limitada por la velocidad de propagación del sonido en el riel y por el estado superficial del mismo, dado que la técnica necesita de un medio de acople (para lo cual generalmente se utiliza agua). En [6] y [7] se combinan el método de US el método de corrientes inducidas (CI). En el caso de las CI, su aplicación apunta principalmente a poder detectar y evaluar de manera temprana la evolución de los defectos superficiales del tipo FCR, lo cual no puede hacerse por ultrasonido; aunque se demuestra su gran poder de detección para otros tipos de defectos [6]. Además de la identificación y cuantificación de las fallas, con este tipo de inspecciones se busca, también, la automatización de la inspección y el incremento de la velocidad de la misma.

Todas las implementaciones de los END implican conocimientos particulares sobre los tipos de fallas y sobre el material. En el caso de una inspección de rieles ferroviarios, además de los problemas extras, que tiene la aplicación del método de CI a componentes ferromagnéticos [8]; existe el problema adicional de la restauración de señales de un defecto debido al ruido eléctrico adyacente a las vías y la corriente de regreso de los motores de los vagones eléctricos. Todo lo enumerado, ocasiona desafíos nuevos y particulares de este tipo de infraestructura ferroviaria, que hacen que se incremente el valor del servicio que prestan las empresas que actualmente se dedican a prestar este tipo de sistemas de inspección.

3. Fenómeno de fatiga de contacto por rodadura en rieles y su inspección por corrientes inducidas

3.1. El ensayo por corrientes inducidas y su aplicación a la inspección de rieles

El END por CI se fundamenta en la ley de Faraday-Lenz. Una bobina (o varias según la técnica) alimentada por una corriente alterna produce un campo magnético denominado primario, el cual genera corrientes inducidas en el componente conductor a inspeccionar. Mediante la misma bobina u otra bobina o sensor inductivo (o conjunto de sensores) (Figura 1) se concatena el campo magnético secundario producido por las CI; el parámetro eléctrico que se registra y da cuenta de este fenómeno es la impedancia reflejada debida a dichas CI.

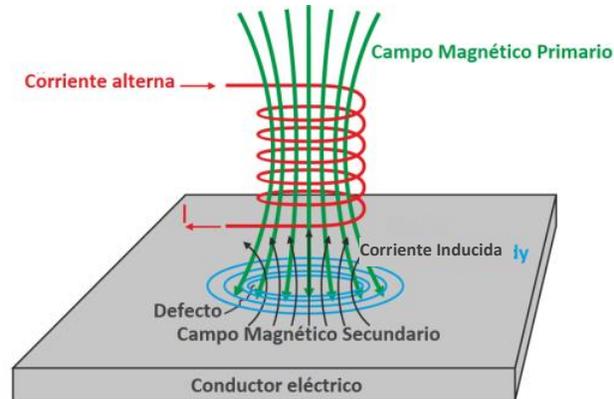


Figura 1: Campo magnético primario y secundario. Corriente inducida sobre el espécimen de prueba.

Esa impedancia depende de la frecuencia de ensayo; de las características electromagnéticas del material (permeabilidad magnética y conductividad eléctrica); de las geometrías del componente y de las bobinas; del espacio existente entre la bobina (o bobinas) de inspección y la pieza bajo prueba (en CI esta separación se denomina lift-off, ver Figura 2); también depende del estado de la superficie del componente (rugosidad, presencia de óxidos, etc.) y de la microestructura del material. Los equipos convencionales de CI utilizan la técnica de puente de corriente alterna (CA) para registrar variaciones en la impedancia reflejada [8]. En el método de CI se pueden aplicar diferentes técnicas, según como se conecten las bobinas (o la bobina) de emisión y recepción, [8]. En el caso de la técnica emisor - receptor, una bobina (o varias) emite la onda electromagnética que crea las CI en el material a inspeccionar, y otras bobinas (o una sola) denominadas receptoras colectan el campo secundario y forman parte de unas de las ramas del puente del mencionado puente de CA, Figura 3. Durante la aplicación convencional del ensayo se procede de la siguiente manera: se balancean las señales de referencias en el puente CA con la bobina (o bobinas) sobre una zona del material sin indicaciones (es decir sin defectos, bordes, etc.); luego se procede al escaneo (o inspección) de la superficie. En el caso de pasar la sonda por una discontinuidad del componente se origina un desbalance en el puente que es registrado como un patrón tipo Lissajous en la pantalla del equipo de CI.

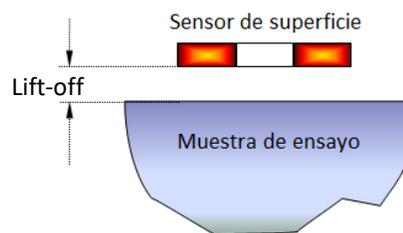


Figura 2: Lift off, sensor (bobina) y muestra.

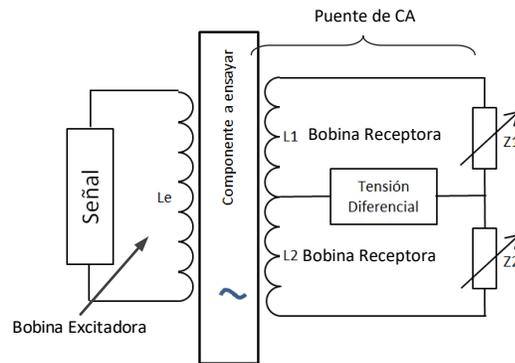


Figura 3: Puente de CA de un equipo CI. Técnica emisor - receptor.

Este enfoque tradicional del ensayo implica registrar el cambio de la impedancia de la sonda que se produce al pasar por una discontinuidad [8]. Se utilizan una o ambas componentes de la impedancia compleja para identificar una falla y determinar sus características. En términos generales, esto constituye el análisis tradicional de datos en un ensayo de CI y continúa empleándose en la mayoría de los ensayos comerciales en la actualidad. Para poder analizar y reconocer las señales que son ocasionados por cada discontinuidad se utilizan **patrones de calibración** (aquí **“patrones de calibración”** se refiere a defectos fabricados ad hoc en un componente similar al inspeccionado). Los patrones se construyen con defectos o indicaciones características de cada ensayo (**“indicación”** en los END se refiere a cada señal que puede ser reconocida en el equipo; estas no sólo son debidas a defectos, sino que pueden ser producidas también por cambios de geometría, de lift-off, de conductividad, de permeabilidades, por proximidad a otro componente, etc.). El operador de CI debe conocer el tipo de indicaciones que encontrará en un ensayo particular; así se podrá fabricar el patrón adecuado y predecir el tipo de señales que se pueden obtener. Para este tipo de aproximación no se utiliza ningún modelo de interacción del campo electromagnético con el material a inspeccionar. De aquí en adelante, se deberá prestar atención a que se refiere la palabra **“patrón”**. Más arriba, en este párrafo, se expresó que se entiende por **“patrón de calibración”** en los ensayos de corrientes CI. Por otro lado, esos defectos patrones generaran **“señales patrones”** que permitirán identificar un defecto de su mismo tipo durante la inspección. Este concepto elemental del procesamiento de señales siempre estuvo presente en los ensayos de CI. No obstante, este concepto de **“patrón”** es más profundo y tiene implicancias más generales en el procesamiento de señales.

Los avances de los últimos años en tecnología de detección, en desarrollo de software y hardware dedicados a la reconstrucción y el procesamiento de señales, combinados con los avances en ciencia de materiales, han expandido el campo de aplicación de los ensayos no destructivos en general; creando un escenario de constante innovación. En el caso de los servicios convencionales con interés comercial más requeridos del ensayo por CI en la industria, los avances que más se han aplicado son: los relacionados al mejoramiento en la detección (desarrollo de sondas y sensores); los de transmisión y almacenamiento de datos; y los que hacen a la fabricación de equipos más portátiles. Pero el análisis e interpretación de las señales no difieren, en gran medida, de la aplicación tradicional en la industria en general y en la inspección ferroviaria en particular [9].

Desde el punto de vista del análisis de señales, un aspecto que se ha aplicado desde los comienzos en CI es la utilización de filtros y adición de señales. Pero esta aplicación se limitó a eliminar el ruido eléctrico (proveniente de equipos y conexiones) y a la resta de alguna señal conocida, y bien definida, dentro de una inspección particular (como puede ser la señal generada por una placa soporte en la inspección de un intercambiador de calor, [10]). En general, no es de uso corriente la utilización de alguna otra herramienta del análisis de señales para tratar señales espurias

y lograr la identificación de defectos o la selección de materiales, durante un ensayo de CI. En los ensayos convencionales de CI, la presencia de esas señales no deseadas hace a menudo imposible la aplicación del mismo. Como un ejemplo de la nueva tendencia en este sentido, en [11] se presenta un novedoso análisis de las señales de CI en la inspección de rieles, con el cual se estudia la compensación de la señal de variación de lift-off (Figura 2) debida a las vibraciones que se producirían en una inspección montada en un tren.

En los ensayos de CI pueden generarse un gran número de indicaciones; esto se incrementa en el caso de la inspección de rieles donde, por ejemplo, en el caso de tramos curvos los head checks pueden ocurrir a lo largo de cientos de metros con más de 300 fisuras por metro [6]. En este caso no es razonable que todos los datos sean analizados visualmente por un operador como ocurre con otras aplicaciones de CI, como es la inspección de tubos. Por esta razón, es importante poder tener algún método de clasificación automática de indicaciones que permita discriminar cuales son las más relevantes.

Desde hace aproximadamente una década en Alemania, se ha empezado a realizar pruebas equipando trenes de inspección con sistemas de CI [6]. Estos sistemas complementan, entre sí, los métodos no destructivos de US y CI durante la misma inspección: la técnica de CI se ha desarrollado para ser capaz de identificar y evaluar defectos superficiales de FCR; mientras que con la técnica de US se analiza el riel en forma volumétrica.

Originalmente, las inspecciones no destructivas de rieles estaban dirigidas a detectar heterogeneidades volumétricas del riel aplicando US convencional. La mayoría de esas inhomogeneidades tienen su origen en defectos de fabricación o en defectos introducidos durante el montaje de las vías; que bajo la acción de una carga cíclica pueden provocar la rotura del carril por la propagación de una fisura originada en los mismos. Hoy en día, debido a mejores métodos de fabricación de rieles, esos defectos de fabricación juegan un papel secundario y los daños en los rieles se originan cada vez en mayor proporción en la superficie rueda/riel, como resultado de la fatiga de contacto por rodadura.

Según las aplicaciones que se presentan en [6] y [7], casi todos los defectos **superficiales** en rieles relevantes para la seguridad ferroviaria pueden ser detectados por CI; aunque el sistema fue inicialmente diseñado para la detección de los defectos producidos por FCR denominados “Head Checks”. En [6] se analiza el poder de la técnica de CI utilizada para la detección y localización de indicaciones y para la cuantificación del daño: la Tabla 1 corresponde a la tabla 1 de [6], y muestra el poder de detección y cuantificación del daño que los autores lograron. El primer y el tercer defecto de la Tabla 1 son dos de los tres defectos de FCR más comunes, el tipo de defecto de la fila dos es común en los trenes de alta velocidad, y el resto de los defectos no se consideran producidos por FCR; pero igual pueden ser detectados por CI, para más información sobre los defectos en rieles se pueden consultar [12].

Tabla 1: Poder de detección de la técnica de CI aplicada a rieles, [6].

Category	Detectability	Statement
Head checking	very good	Quantity, location, depth
BelGroSpi's	good	Quantity, location
Squats	good	Quantity, location
Indentures	very good	Quantity, location, period
Wheelburns	very good	Location, extent
Short/long pitch corrugation	good	Location, period
Grinding marks	very good	Quantity, place, period
Welds	good	Location, kind, lack of fusion
Rail joints	very good	Location, kind

3.2. Defectos producidos por fatiga de contacto por rodadura y su inspección por corrientes inducidas

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; esto se incrementa en el transporte público de pasajeros que utilizan los trenes para desplazarse en las grandes urbes. Como ya se mencionó, el incremento de las exigencias sobre los rieles junto con las formas modernas de producción de los mismos, 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, [6] y [13].

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 [14]. 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 debidos a este fenómeno denominado FCR. Una vez producido el daño, generalmente en forma de fisuras, los siguientes ciclos de rodadura producen la propagación del mismo en la 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 4 (a), [13]. 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 4 (b), [13]. 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 4), [14]. Para comprender mejor las tensiones ejercidas sobre un riel en servicio puede consultarse [12].

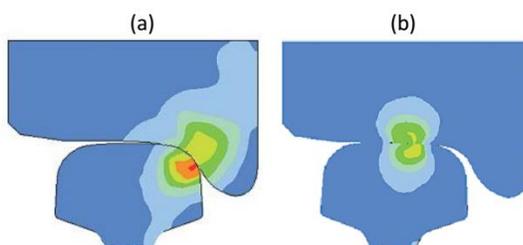


Figura 4: Tensiones de contacto en la interface rueda/riel, [13]: (a) en curvas cerradas, (b) en vías rectas.

Los defectos de FCR que más comúnmente se presentan son: “head checks” (HC) (Figuras 5 y 6), descascarillado (“shells” o “shelling”) (Figura 7) y “squats” (Figura 8) ([13], [15], [16], [17]); en menor medida se presentan descamaciones leves (“mild flakings”) (Figura 9 (a) línea Sarmiento, Argentina; Figura 9 (b) [18] y “belgrospi” [19] (Figura 9 (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.

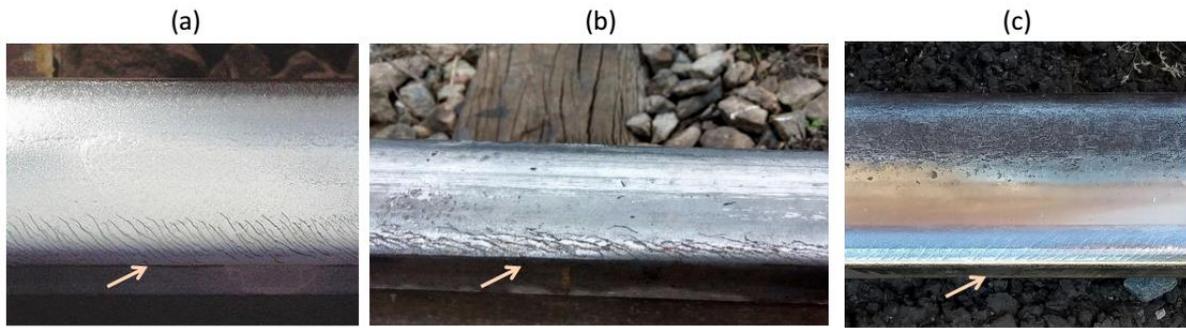


Figura 5: Head check en la región esquina de trocha. (a) Indicaciones de head checks, método de END de partículas magnéticas [13]. (b) Vía Línea San Martín, Argentina. (c) Vía Línea Sarmiento, Haedo, Argentina.

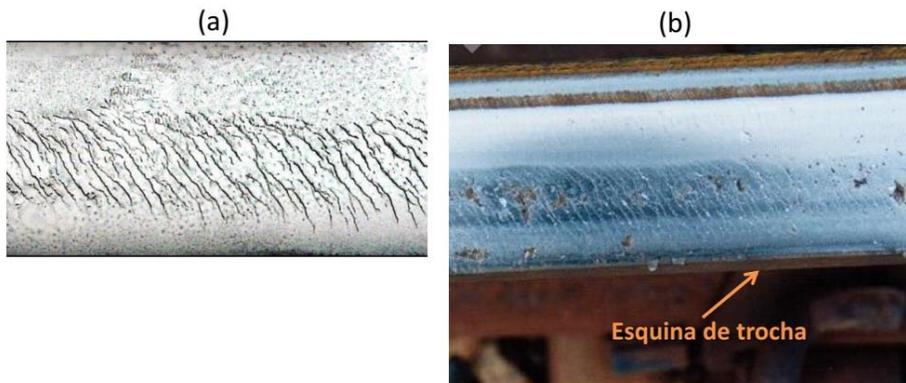


Figura 6: Head checks en la superficie de rodadura: (a) HC [16], (b) HC con descamaciones [17].

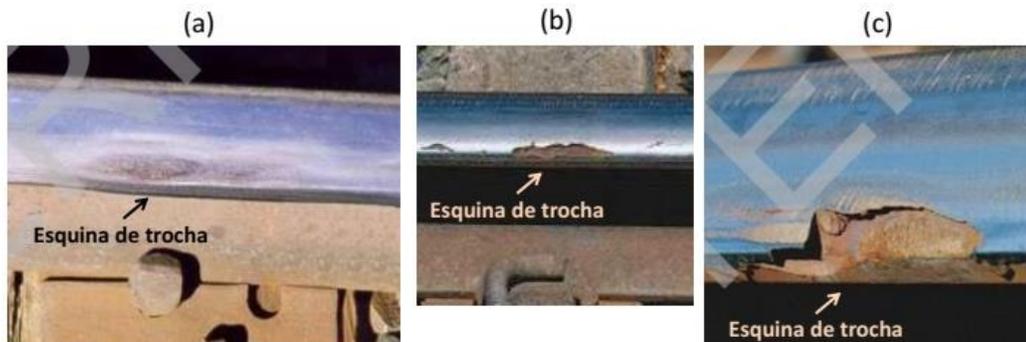


Figura 7: Descascarillado (shelling) en diferentes etapas, [17].



Figura 8: Squat, [15].

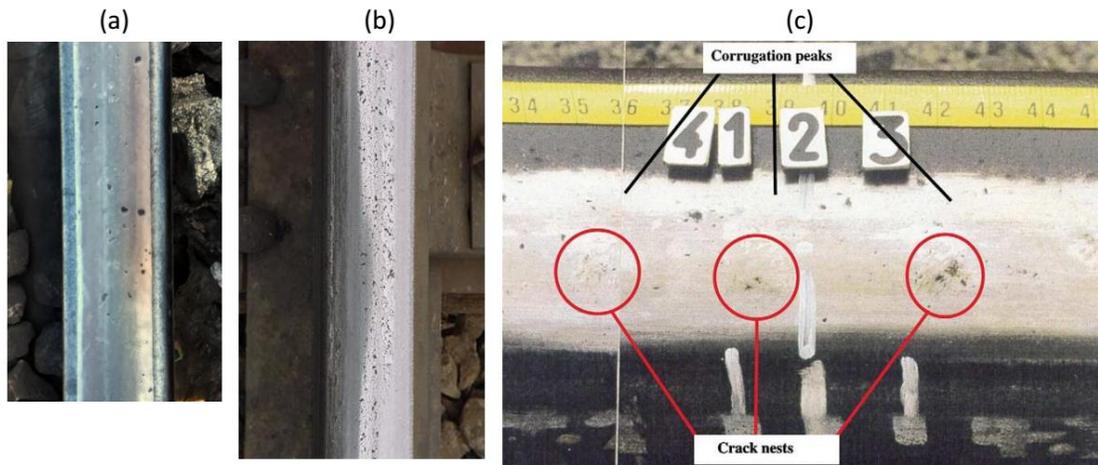


Figura 9: (a) y (b) descamaciones leves (mild flakings): (a) línea Sarmiento cercana estación Haedo, (b) [18]. (c) belgrospis (círculos rojos) en zona de corrugación, [19].

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 10 (a), [18]); las descamaciones más severas en la superficie del riel (spalling, Figura 10 (b), [18]) pueden corresponder a un estado avanzado con pérdida de material en la superficie de rodadura de un daño iniciado como HC; o el descascaramiento (flaking severo, Figura 10 (c), [18]) corresponde a descamaciones importantes desarrolladas a partir de HC en la esquina de trocha o en la superficie del riel cercana a la esquina de trocha.

Lamentablemente todos los defectos mencionados en el párrafo anterior, salvo los belgrospi, se observan en los ferrocarriles de Argentina, [12]; los belgrospi aparecen generalmente en trenes de alta velocidad, [19]. 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 sub-superficiales en materiales conductores [13] y [16]. Si bien la introducción 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 [6] y [7]. Esto es un aspecto común de los END, donde los métodos aplicables no son excluyentes sino complementarios; así el desarrollo del método de CI en rieles podrá potenciar y retroalimentar al método de US, el cual ya se aplica a rieles en el país.

Las Figura 5 (b) y (c) muestran defectos producidos por FCR en líneas ferroviarias argentinas; el caso de la Figura 5 (c) corresponde a HC incipientes en las cercanías de la estación Haedo de la línea Sarmiento; se debe mencionar que estas vías son nuevas, han pasado menos de 10 años desde su renovación. 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 conservación 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 se está desarrollando para lograr un uso más intensivo del ferrocarril; esto factores acrecientan las exigencias sobre los rieles y provocarán el desarrollo, cada vez más frecuente, de defectos de FCR inducidos por el tráfico.

Cualquier plan de conservación deberá formar parte de un plan más general de mantenimiento predictivo, dentro del cual los END son una herramienta fundamental, y donde los objetivos principales deben ser mejorar la seguridad y la confiabilidad del transporte.

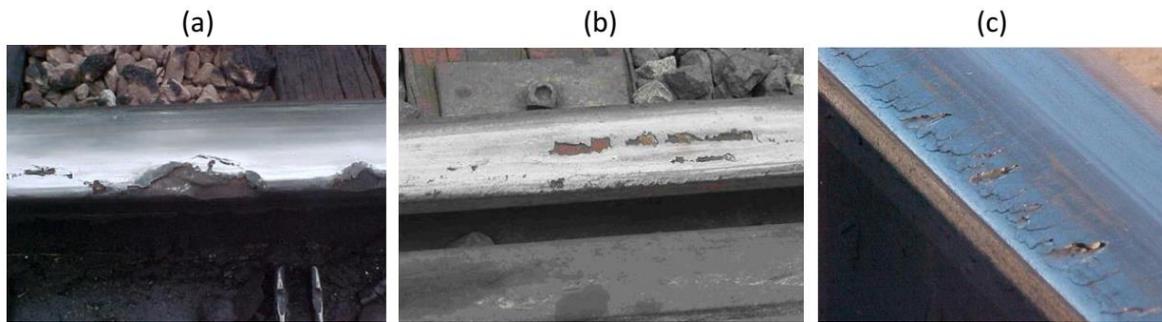


Figura 10: (a) descascarrillado (shelling severo), (b) spalling en la superficie del riel, (c) descascaramiento (flaking severo) en la superficie del riel cercana a la esquina de trocha, [18].

Para realizar cualquier inspección no destructiva, es condición necesaria tener conocimientos sobre el componente (material y solicitaciones a las que está sometido) y sobre la defectología que puede presentarse en las condiciones de servicio. Por lo tanto, a continuación se desarrollarán algunas características de los defectos más importantes producidos por RCF. Para una introducción a las cargas a las que son sometidos los rieles en servicio y la defectología se puede consultar [12].

3.2.1. Head Checks

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 5; pero también se pueden presentar en la parte superior de la superficie del riel como se muestra en la Figura 6. 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, Figura 11, [20]; y ocurren en grandes cantidades distribuidas en toda la zona afectada, Figuras 5, 6 y 10 (c). En [20] 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, [17], Figuras 6 (b), 10 (b) y (c).

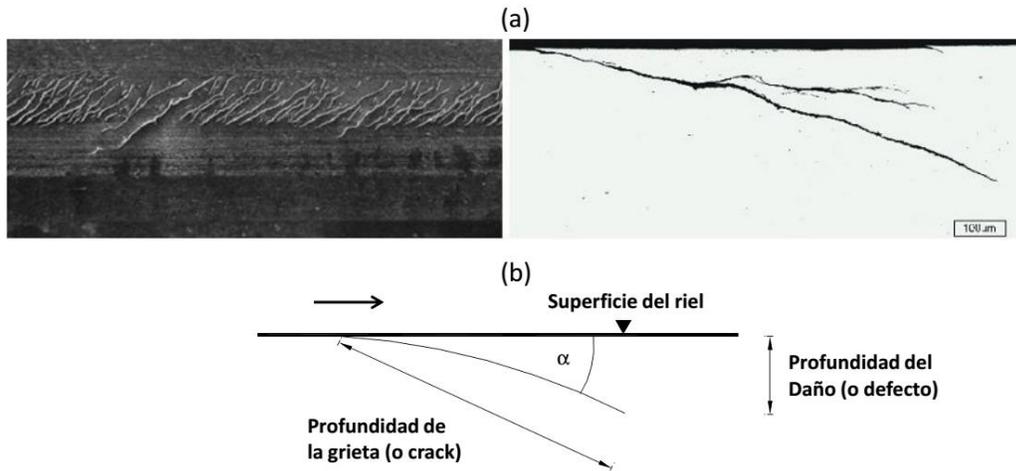


Figura 11: (a) [20], (b) [16], la flecha indica la dirección de rodadura.

La extensión o la profundidad de un head check no puede ser estimada observando solo su superficie visible. En la Figura 12 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, [13]; 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.



Figura 12: Superficie de fractura iniciada en un head check, en laboratorio, [13].

Cuando ocurre una fractura frágil real, 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. 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 13; donde se distinguen dos superficies visualmente diferentes: área de fatiga (la cual se divide en las zonas de crecimiento normal y rápido) y área de rotura (crecimiento repentino), [18].

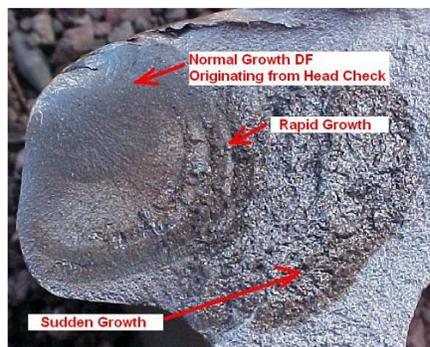


Figura 13: Detalle de fractura de un riel luego de una rotura ocasionada por la propagación de un head checks, [18].

3.2.2. Squats

Los squats son defectos que se pueden clasificar como superficiales o sub-superficie y pueden ser de dos tipos, [15] y [17]:

(1) Los más comunes son los que se inician en forma sub-superficial 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 14, [17].

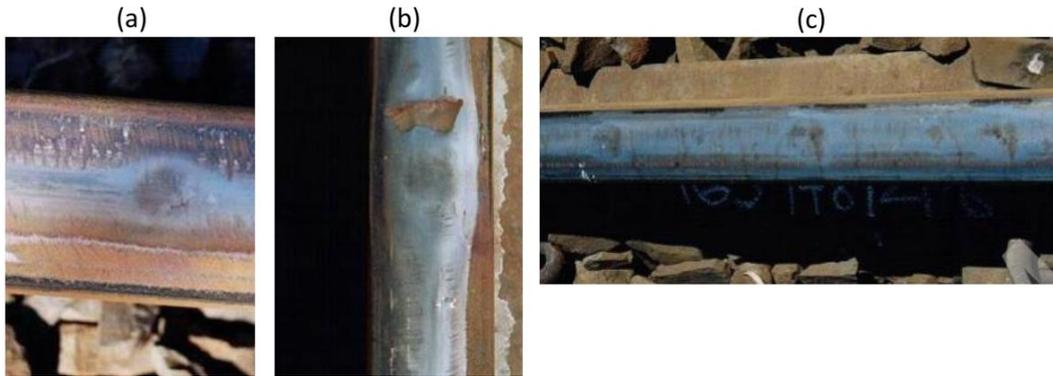


Figura 14: Ejemplos de squats de corona: (a) pequeño, (b) grande y (c) múltiple, [17].

La zona defectuosa aparece oscurecida, Figura 14, esto se debe a la existencia de cracks sub-superficiales que se extienden principalmente en un plano horizontal entre 3-5 mm por debajo de la superficie, Figura 15, [15]; esto causa una depresión en la superficie del riel. Cada squat de este tipo consiste en dos fisuras sub-superficiales 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 15. 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, [15] y [17].

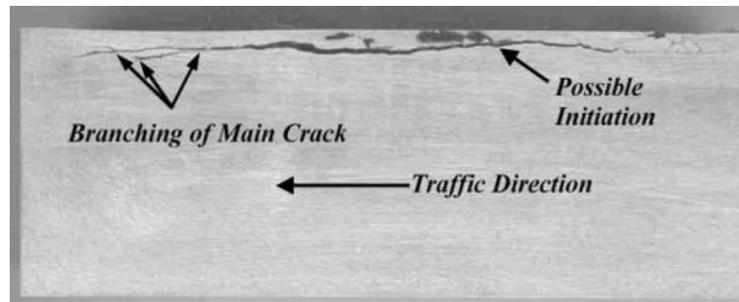


Figura 15: Sección transversal de un defecto tipo squats, [15].

(2) Son squats que se inician a partir de fisuras de head checks existentes en la esquina de trocha, Figura 16, [17]. 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 de curvas poco pronunciadas y en vías tangentes. También pueden ocurrir como defectos aislados o como múltiples defectos aislados, Figuras 14 y 16. 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.

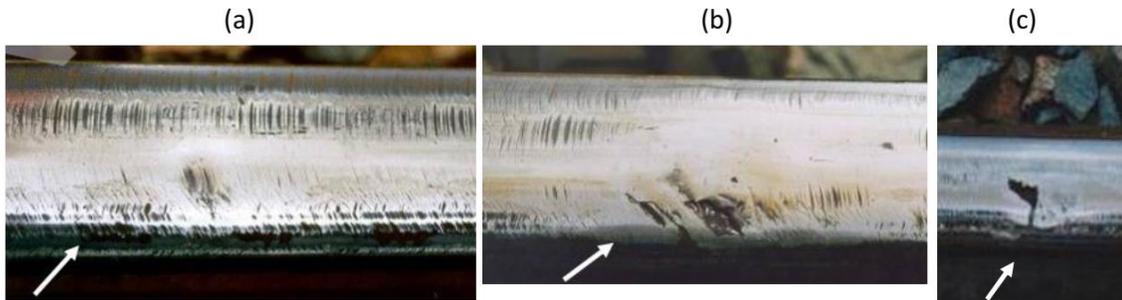


Figura 16: Ejemplos de squats iniciados en head checks de la esquina de trocha: (a) pequeño, (b) y (c) grandes; las flechas indican la esquina de trocha, [17].

Las depresiones en la banda de rodadura asociadas a este tipo de defectos, Figura 14 y 16, incrementan las cargas verticales por impacto de las ruedas sobre el riel; lo cual exacerba el deterioro de las vías y del material rodante. Existe el peligro que alguna de las fisuras sub-superficiales comiencen a crecer hacia abajo convirtiéndose en un defecto transversal plano, similar al de la Figura 13; con la posibilidad de que resulte en la falla completa del riel si no se detecta a tiempo, como se muestra en la Figura 17. En menor medida las fisuras pueden ramificarse hacia la superficie y producir descamaciones, Figura 14 (b) y Figuras 16 (b) y (c).

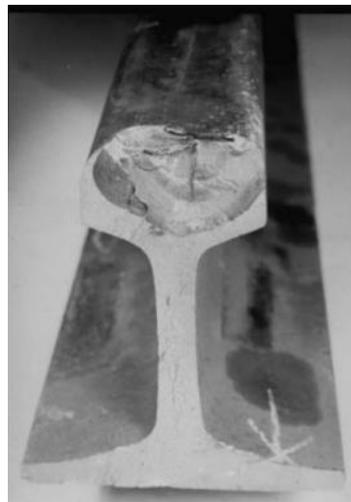


Figura 17: Rotura de un riel resultante de la propagación de una fisura de squats, [15].

3.2.3. Shelling

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, [17]; 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 18 (a), [17]. 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 18 (b), [18] y Figura 18 (c), 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 19, [18].

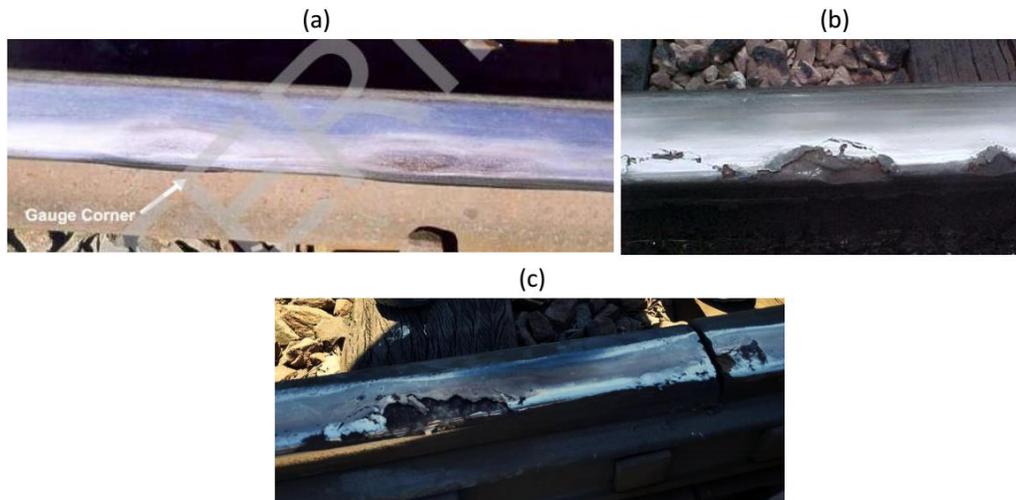


Figura 18: (a) Shelling en estado incipiente (manchas oscuras) (gauge corner: esquina de trocha), [17]. (b) y (c) descascarillados producido por shelling: (b) [18], (c) línea Sarmiento cercanía estación Haedo.



Figura 19: Detalle de fractura originada en un shell de la esquina de trocha, [18].

Como ya se mencionó, tanto los defectos de HC como el shelling son producidos por las elevadas tensiones de corte que se desarrollan en la interface 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 , [17]). Según [17] 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 serpeo, [12]) 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 [17].

Referencias

1. 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**.
2. 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>.
3. 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**.
4. Doherty, A., et al., *Why rails crack?*, in *Ingenia Online*. Royal Academy of Engineering: London. p. 23-28. **2005**.
5. AUCOFER S. A. Auditora y Consultora Ferroviaria. 'Inspección de Rieles Ferroviarios por Ultrasonido'. Accedido: 10/04/2018. Disponible: <http://www.aucofer.com.ar/index.php/servicios/ultrasonido-de-rieles>.
6. 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**.
7. 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**.
8. Wright, M., 'Eddy Current Testing Technology'. 2nd ed. **2015**, Ontario, Canada: Eclipse Scientific.
9. Rohmann GmbH. 'Draisine WPG D340 Eddy Current Rail Inspection System'. Accedido: 10/04/2018. Disponible: <https://www.rohmann.com/en/blog/portfolio/draisine-wpg-d340/>.
10. O'Connor, M. Eddy Current Technology Incorporated. 'Eddy Current Testing of Heat Exchanger Tubes Is Not Quite That Easy'. Accedido: 10/04/2018. Disponible: <http://eddy-current.com/eddy-current-testing-of-heat-exchanger-tubes-is-not-quite-that-easy/>.
11. Liu, Z., et al.; 'Eddy Current Rail Inspection Using AC Bridge Techniques'. *Journal of Research of the National Institute of Standard and Technology*, 118: p. 140-148. **2013**.
12. Romero, R. and Fava, J., *Defectos en rieles, sus características, causas y métodos de ensayos no destructivos para su control*, in *Informe y Material didáctico*. Grupo de Ensayos No Destructivos Aplicados a la Industria Ferroviaria, Facultad Regional Haedo, Universidad Tecnológica Nacional: Buenos Aires, Argentina. **2017**.
13. 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**.
14. 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**.
15. 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**.
16. 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**.

17. 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>.
18. 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/L03531>.
19. 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**.
20. Pohl, R., Thomas, H. M., and Casperson, 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**.