

EVALUACIÓN DE FISURAS SUPERFICIALES EN RIELES Y COMPONENTES PLANOS FERROMAGNÉTICOS POR CORRIENTES INDUCIDAS

Marcelo Gutiérrez^{1,3}, Javier Fava^{1,2}, Tomás Di Fiore¹ y Juan Vorobioff^{2,3}

¹ Facultad Regional Haedo – Universidad Tecnológica Nacional
París 532, Haedo, Pcia. de Buenos Aires, Argentina
correo-e: mgutierrez@frh.unt.edu.ar

² Centro Atómico Constituyentes – Comisión Nacional de Energía Atómica
Av. Gral. Paz 1499, San Martín, Pcia. de Buenos Aires, Argentina

³ Facultad Regional Buenos Aires – Universidad Tecnológica Nacional
Medrano 951, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina

RESUMEN

Con el objetivo de poder detectar defectos cercanos a la superficie e inducidos por el tráfico en rieles ferroviarios, se está desarrollando un sistema prototipo para la inspección de componentes planos ferromagnéticos por corrientes inducidas. El sistema emplea la técnica emisor-receptor de campo cercano, con una bobina emisora y dos receptoras conectadas en modo diferencial. Se presentan las primeras etapas del desarrollo: el tipo de arreglo de bobinas utilizado; la caracterización de las bobinas; y la utilización del sistema para el reconocimiento de ranuras de diferentes profundidades realizadas sobre una planchuela de acero al carbono y sobre tramos de rieles. En las inspecciones de las ranuras se analizan las señales de salida del equipo con el fin de mejorar su clasificación. En los rieles se lograron diferenciar las señales de los dos tipos de ranuras construidas: perpendiculares y a un ángulo de 25° respecto de la superficie del riel, simulando estas últimas fisuras del tipo “head check”.

Palabras Claves: Corrientes-inducidas, rieles, defectos.

1. INTRODUCCIÓN

En la última década se ha trabajado fuertemente, a nivel mundial, en la detección del daño ocasionado por el tráfico en los rieles ferroviarios, con el fin de aumentar la seguridad de este medio de transporte. Diferentes accidentes causados por rotura de rieles en servicio, motivaron la aplicación de nuevas tecnologías para detectar ese tipo fallas en ruedas y rieles [1].

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) [2,3]. La industria ferroviaria global, estableció como principal interés los defectos producidos por FCR especialmente a lo largo de las últimas décadas.

La producción de aceros más homogéneos, rieles más resistentes al desgaste debido al endurecimiento de su cabeza y las nuevas técnicas de construcción de vías, han causado un cambio en la distribución de los defectos que tradicionalmente se detectaban en los rieles: 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; pasando los defectos inducidos por el tráfico a tener una mayor preponderancia.

La FCR 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. El aumento de la densidad del tráfico, las cargas que ejercen el conjunto rueda-eje y la velocidad, así como la presencia de líquidos (agua, aceite, grasa o combustible), pueden reforzar el crecimiento de las grietas [2]. En contraste con esto, la geometría correcta de la cabeza, la geometría correcta del contacto rueda/riel y el mantenimiento adecuado (en el cuales los ensayos no destructivos (END) son una pieza importante) pueden reducir los problemas debidos a FCR. Para minimizar los riesgos operacionales de los rieles, las operadoras de la infraestructura ferroviaria realizan esmerilados como una acción de mantenimiento preventivo contra la FCR; pero en algunos casos este grave problema, puede llevar a un reemplazo prematuro de los rieles. En el caso que no se corrija puede ser el origen de una falla completa del riel en servicio. La experiencia indica que no aplicar a tiempo planes de detección y un

mantenimiento eficaz, el ciclo de vida estándar de los rieles se puede reducir a solo 2-3 años debido a daños producidos por FCR [2].

El método de ensayos no destructivos históricamente más empleado para la inspección de rieles es el ultrasonido convencional; sin embargo, este método no permite detectar defectos de tipo superficial como son las fallas producidas por FCR, que sí pueden ser detectadas por el método de corrientes inducidas (CI) [3]. Se presentan en este trabajo los avances logrados en la construcción de un equipo prototipo que aplica el método de END por CI para la inspección de defectos superficiales en rieles y componentes planos ferromagnéticos. A continuación, para finalizar la introducción, se describe uno de los tipos más importantes de defectos producidos por FCR. En materiales y métodos se describe el equipo y los componentes ensayados. Por último se presentan los resultados obtenidos del escaneo de patrones con defectos realizados sobre rieles y componentes ferromagnéticos planos; para finalizar con las conclusiones.

1.1. Defectos tipo “head checks”

Uno de los tipos de defectos que más preocupan son los denominados “head checks” (HC); estos aparecen en la superficie del riel como un patrón de fisuras pequeñas. Se producen principalmente en la esquina de trocha Figura 1 (a) y (b); también se pueden presentar en la banda de rodadura como se muestra en la Figura 1 (c), [3]. Estas fisuras o “*cracks*” ocurren en grandes cantidades distribuidas en toda la zona afectada, Figuras 1, y se extienden hacia adentro del riel en un ángulo de 15° a 30° con respecto a la superficie del mismo en la dirección de rodadura, Figura 2 [3, 4]; en [4] establecen a partir de datos estadísticos que este ángulo de penetración es en promedio 25°. En [4] también se informa una distancia entre “*cracks*” de 0,5-7 mm y se evalúan fisuras producidas por HC con profundidades entre 1 y 6 mm. Estos defectos presentan fisuras abiertas a la superficie del riel; las cuales en etapas avanzadas del daño pueden producir una pérdida apreciable de material o comenzar a propagarse en un plano transversal hacia el interior del riel y generar una fractura en servicio [5].

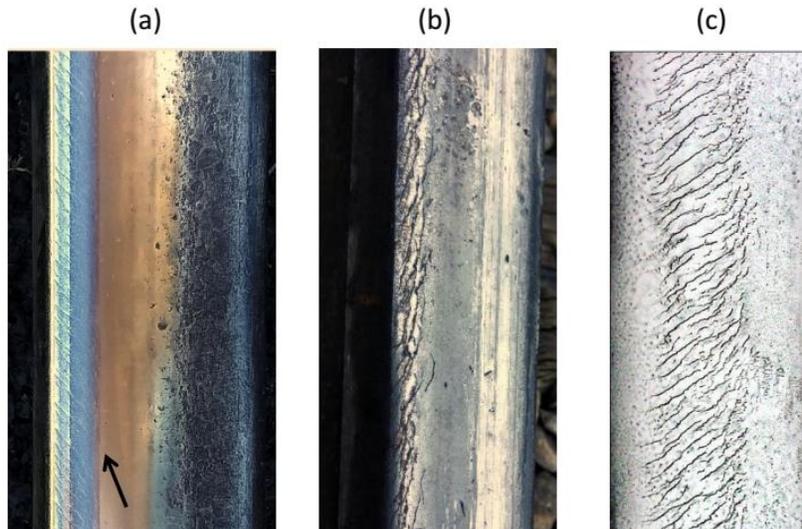


Figura 1: “Head checks” en esquina de trocha: (a) estado incipiente (línea Sarmiento, cerca de estación Haedo), (b) daño más avanzado (línea San Martín). (c) “head checks” en banda de rodadura, [3].

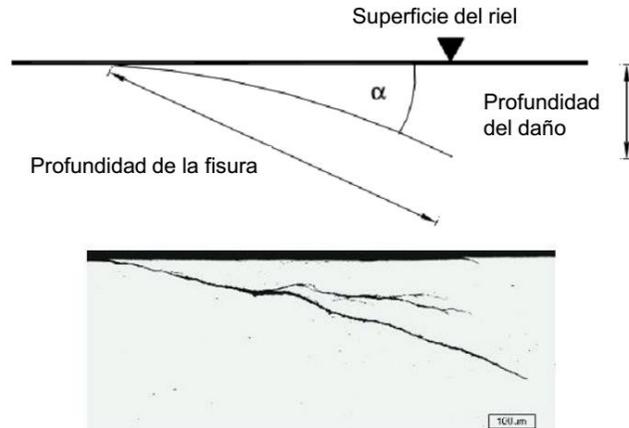


Figura 2: Detalle de cómo comienza a propagarse el HC hacia adentro del riel [3, 4].

En alguna etapa de su desarrollo, alguno de los “head checks” 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 fase final. Cuando ocurre la rotura por fractura frágil iniciada por la propagación de un HC, existe una posibilidad muy alta que se produzca una serie de fracturas causadas por otros HC existentes en la cercanía; pueden romperse varios metros del 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 RCF, es la típica superficie de fractura por fatiga, Figura www.caim2018.com.ar

3; 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), [5].



Figura 3: Detalle de fractura iniciada desde un “head check”, [5].

2. MATERIAL Y MÉTODOS

El dispositivo desarrollado, [6], emplea la técnica emisor-receptor de campo cercano en modo diferencial; la técnica de CI de campo cercano está especialmente recomendada para detectar discontinuidades en materiales ferromagnéticos [7]. Un oscilador suministra una tensión sinusoidal de referencia $V_{ref}(t)$ a un amplificador de corriente cuya carga es la bobina L_e , creando corrientes inducidas sobre el riel. La obtención de las indicaciones provenientes a los cambios del campo magnético en presencia de los defectos, son captadas por los inductores L_1 y L_2 ; las cuales, constituyen una parte del puente de corriente alterna (CA) [8]. Para calibrar el sistema se requiere obtener una tensión diferencial amplificada $V_{dif}(t)$ cercana a un valor nulo en una zona libre de defecto. Para lograr esto, es necesario ajustar las impedancias variables Z_1 y Z_2 mientras que se monitorea la tensión diferencial como se observa en la Figura 4.

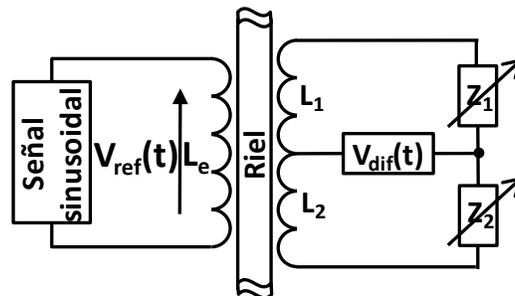


Figura 4: Puente de CA del equipo de CI. Técnica Emisor – Receptor en modo diferencial.

La tensión $V_{dif}(t)$ y $V_{ref}(t)$ son cuantificadas en muestras discretas. Las señales digitales $X_{ref}[n]$ y $X_{dif}[n]$, son procesadas por el amplificador lock-in digital para demodular la señal automodulada de las fisuras como se indica en la Figura 5 [9, 10].

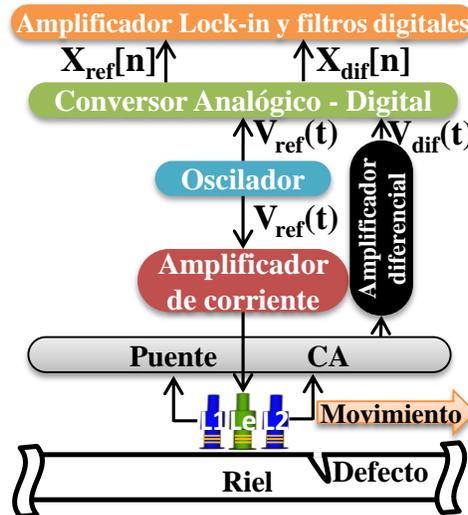


Figura 5: Diagrama en bloques del sistema de inspección y tratamiento de las señales.

2.1. Patrones

Se construyeron dos patrones sobre tramos de rieles con fisuras fabricadas por electroerosión sobre la cabeza del riel. La Figura 6 (a) muestra uno de los patrones, en el cual los defectos son perpendiculares a la banda de rodamiento del riel y sus profundidades están comprendidas entre 1 mm y 7 mm. Para el otro patrón las fisuras son oblicuas formando un ángulo de penetración de 25° con respecto a la superficie de la cabeza del riel y sus extensiones se encuentran entre 1 mm y 7 mm, Figura 6 (b); este patrón busca simular un head check, ver **1.1 (Defectos tipo “head checks”)**. Todos los defectos hechos sobre los rieles tienen un ancho de 0.22 mm. En ambos patrones la separación entre las ranuras es de 80 mm.

Además, se fabricó un patrón plano en acero ferromagnético SAE 1010; las profundidades de sus fisuras se muestran en la Figura 6 (c). Se utilizó una planchuela de 750 mm de ancho y 7 mm de espesor; y la separación entre fisuras fue de 40 mm. En este caso, las ranuras fueron maquinadas con una sierra circular; y el ancho fue de 0.38 mm, aproximadamente.

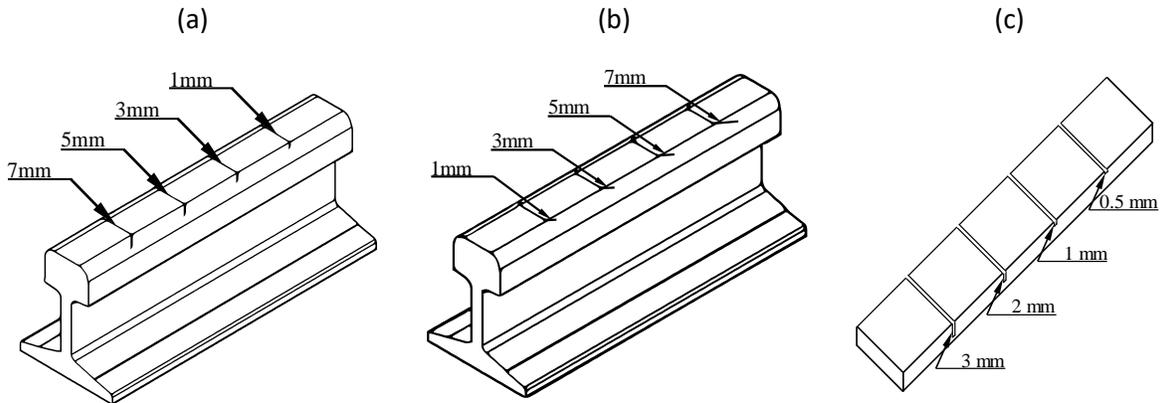


Figura 6: a) Patrón en riel de fisuras perpendiculares. b) Patrón en riel de fisuras oblicuas. (c) Patrón sobre planchuela.

2.2. Sondas

Se ensayaron bobinas cilíndricas devanadas con alambre de cobre AWG36 (0.127 mm) sobre carretes de plástico ABS, de radio interno 4 mm, lift-off 0.4 mm y altura 15 mm; con diferentes números de vueltas: 400, 600 y 800. Se buscó la mayor sensibilidad en la salida del sistema, esto se logró con el inductor de 400. Los inductores se caracterizaron con un medidor LCR a una frecuencia de 25 kHz, se presentan los resultados en la tabla 1.

Tabla 1. Inductancia, resistencia y número de vueltas de las bobinas.

	Inductor A	Inductor B	Inductor C
Vueltas(U.A.)	400	600	800
Inductancia (μ H)	607	1781	2298
Resistencia (Ohm)	15	22	33

2.3. Configuración experimental

En la Figura 7 se muestra el dispositivo. El movimiento del cabezal de inspección se realiza mediante un desplazador X-Y construido específicamente para este tipo de ensayos. De esta forma se consigue simular diferentes escenarios en cuanto a los desplazamientos de los sensores sobre las fisuras artificiales en los patrones. El desplazamiento mínimo es del orden de la centésima del milímetro. Los movimientos están controlados por una placa electrónica que incorpora un microcontrolador ATmega 2560. Esta placa se conecta por USB a la computadora encargada de enviar las órdenes de los desplazamientos; permitiendo ajustar aceleración, velocidad y distancia. Para mantener las bobinas apoyadas correctamente sobre los patrones se utilizó un soporte de bobinas con resortes, esto permite minimizar las variaciones del lift-off. Se

www.caim2018.com.ar

diseñó un circuito electrónico encargado de controlar la corriente de excitación a la bobina L_e , ajustar el balance del puente de CA y adecuar los niveles de tensión de las señales $V_{ref}(t)$ y $V_{dif}(t)$. Estas dos señales fueron muestreadas por un adquisidor de datos a una resolución de 16-bit y una frecuencia de muestreo de 200 kHz. La frecuencia de excitación se determinó mediante un barrido de frecuencia entre 3 kHz hasta 15 kHz en pasos de 500 Hz. Se seleccionó la frecuencia de 8 kHz para comenzar a trabajar, por ser una de las que proporcionó mejores resultados en los patrones escaneados.

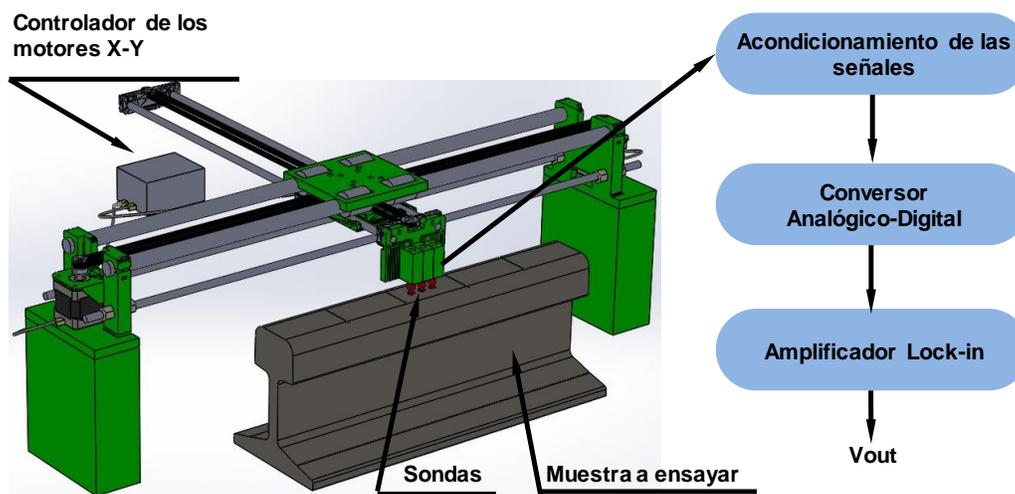


Figura 7: Configuración experimental para la inspección por CI.

3. RESULTADOS

Para analizar la respuesta eléctrica del sistema a las fisuras, se escanearon los tres patrones construido.

3.1. Ensayo del patrón plano

Para caracterizar los daños sobre el patrón plano se utilizó la configuración experimental antes descrita; y se realizaron 10 escaneos sobre el mismo, con el fin de comprobar que la respuesta del sistema sea la correcta. Las señales obtenidas demostraron la repetición de las muestras por lo que se grafica el resultado de un solo barrido, como se observa en la Figura 8. Se observa que es posible separar las fisuras de 3 mm, 2 mm, 1 mm y 0.5 mm.

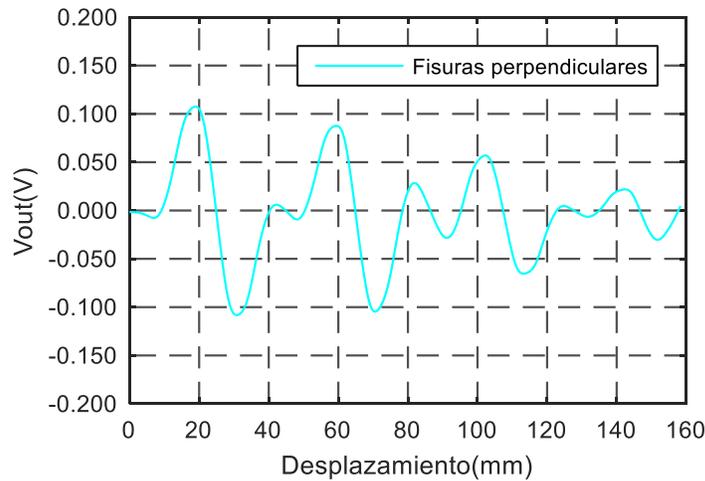


Figura 8: Salida del amplificador lock-in digital correspondiente al patrón plano.

3.2. Ensayo sobre patrones construido en rieles

Se volvió a repetir el ensayo, en este caso se utilizaron los patrones hechos sobre los tramos de rieles. La frecuencia de trabajo no fue modificada, con respecto al patrón plano, tampoco la velocidad de escaneo.

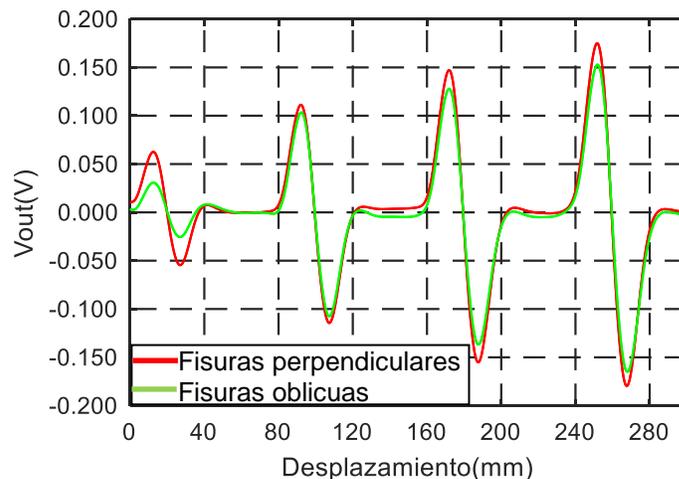


Figura 9: Salida del amplificador lock-in digital correspondiente a los patrones sobre rieles.

Como se aprecia en la Figura 9 no existe una diferencia significativa entre las señales correspondientes a las fisuras perpendiculares y las oblicuas de 3 mm; para el resto de las fisuras las señales de los dos tipos de fisuras parecen no ser equivalentes, en especial para las fisuras de 1 mm.

3.3. Ajuste de curva

Es posible realizar un ajuste de curva para interpolar las profundidades de fisuras intermedias: este ajuste se realizó para las fisuras perpendiculares del patrón fabricado sobre el riel. Se utilizó una aproximación polinómica de grado 2 cuyos datos de entradas son: en el eje vertical se tomó el voltaje máximo $V_{out}(V)$ para cada una de las fisuras y en el eje horizontal las profundidades, Figura 10. El ajuste arroja un coeficiente $R^2=0.999$ y en la Ecuación (1) están los valores de los coeficientes para la función cuadrática propuesta; una curva análoga puede calcularse para las ranuras oblicuas. Este tipo de curva podría utilizarse como curva de calibración durante una inspección de CI.

$$V_{max}(V) = 0.0013 \cdot x^2 + 0.029 \cdot x + 0.035 \quad (1)$$

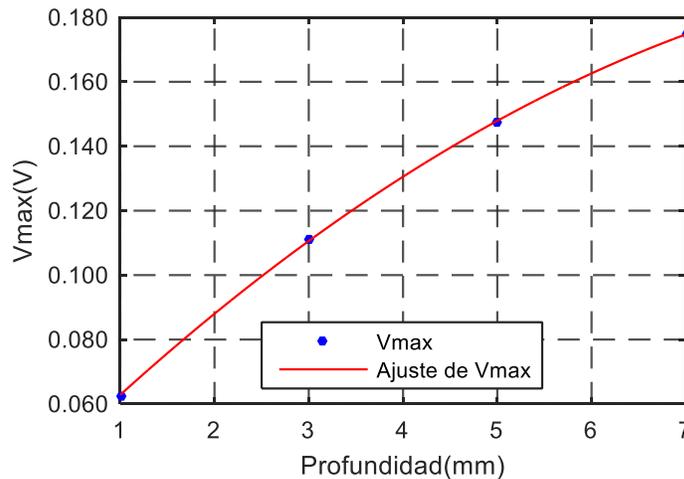


Figura 10: Ajuste de curva para los Valores máximo de V_{out} .

4. CONCLUSIONES

Con el sistema de inspección se logró identificar fisuras superficiales fabricadas sobre la cabeza de tramos de riel, cuyos daños penetran entre 1 y 7 mm. Se evidencian cambios en las respuestas eléctricas entre las ranuras perpendiculares y las ranuras con una inclinación de 25° , Figura 9. El alcance de esta conclusión debe ser más estudiado; ya que va en contrario a lo realizado en [4], donde a partir de la calibración sobre un patrón de ranuras perpendiculares evalúan la profundidad del daño producido por "head checks". Por otro lado, en cuanto a la inspección de este tipo de defectos, a futuro se propone lo siguiente: a) construir nuevos patrones con fisuras de penetraciones intermedias para probar curvas de calibración; y b) fabricar un patrón con varias ranuras espaciadas distancias que representen el verdadero daño producido por la FCR, 1.1

(Defectos tipo “head checks”) y Figura 1, para probar el desempeño del sistema en esta situación.

Se logró también la discriminación de las fisuras fabricadas sobre una planchuela de acero SAE 1010. Como trabajo a futuro, se propone realizar un análisis numérico de la penetración de las corrientes; para poder evaluar la influencia del espesor, la frecuencia y los parámetros del material

5. REFERENCIAS

- [1] Magel E. *Rolling Contact Fatigue: A Comprehensive Review*. Federal Railroad Administration (USA), 2011. Disponible en: <https://nparc.nrc-cnrc.gc.ca/eng/view/fulltext/?id=2629e321-fe89-4eda-8531-662d35dbca8a>. Accedido: 11/05/2018.
- [2] Popović Z., Radović V. *Rolling contact fatigue of rails*. The III Int. Scientific and Professional Conference, CORRIDOR 10, Belgrade, Serbia, 2016. Accedido 11/04/2018. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/299563338_ROLLING_CONTACT_FATIGUE_OF_RAILS.
- [3] Dey A., Thomas H. M., Pohl R. *The important role of eddy current testing in railway track maintenance*. 17th WCNDT, 25-28 October 2008, Shanghai, China.
- [4] Pohl R., Thomas H. M., Casperson R. *Mögliche Fehlerquellen und deren Einflüsse bei der Risstiefenbestimmung mit Wirbelstrom*, DGZfP-Jahrestagung 2009. Disponible: <http://www.ndt.net/article/dgzfp2009/Inhalt/di2b2.pdf>. Accedido: 12/03/2018.
- [5] *Track Inspector Rail Defect Reference Manual*, Office of Railroad Safety , Federal Railroad Administration (USA), 2015. Disponible en: <https://www.fra.dot.gov/eLib/Details/L03531>. Accedido: 25/04/2018.
- [6] Gutiérrez M., Fava J., Di Fiore T., Ruch M., Romero R., Vorobioff J. *Development of a differential test device for eddy current rail inspection*. Aceptado en: 12th European Conference on Non-Destructive Testing, 11-15 June 2018, Gothenburg, Sweden.
- [7] Wright M. *Eddy Current Testing Technology*. Eclipse Scientific, Ontario, Canada, 2015.
- [8] Hague B. *Alternating-current bridge methods, 6th ed*. Sir Isaac Pitman & Sons, London, 1971.
- [9] Scofield J. *A Frequency-Domain Description of a Lock-in Amplifier*. Amer. J. Phys, 62, 2, 129–133, 1994.
- [10] Burdett R. *Amplitude Modulated Signals: The Lock-in Amplifier*. Wiley, New Jersey, 2005.