



Avances en la detección de defectos de fatiga de contacto por rodadura en rieles ferroviarios

Marcelo Gutiérrez^{a,c*}, Javier Fava^{a,b}, Tomas Di Fiore^a, Marta Ruch^b y Juan Vorobioff^{b,c}

^{a*}Facultad Regional Haedo, Universidad Tecnológica Nacional, París 532, Haedo (1706), Pcia. de Buenos Aires, Argentina;

^bComisión Nacional de Energía Atómica, Av. Gral. Paz 1499, San Martín (1650), Pcia. de Buenos Aires, Argentina

^cFacultad Regional Buenos Aires, Universidad Tecnológica Nacional, Medrano 951 (1179), Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina

*mgutierrez@frh.utn.edu.ar

El uso cada vez más intensivo del transporte ferroviario, consecuencia de la renovación de la infraestructura ferroviaria encarada en Argentina; determinará el aumento de la aparición de defectos inducidos por el tráfico en rieles y originados por el fenómeno de fatiga de contacto por rodadura. Este tipo de defectología de fatiga se presenta en su estado incipiente como superficial o sub-superficial; lo que determina que el método preferido para su evaluación sea el de corrientes inducidas. En este trabajo se presentan los avances logrados en la inspección, por corrientes inducidas, de patrones de fisuras fabricados sobre cupones de rieles con un equipo prototipo de laboratorio; el cual aplica la técnica emisor-receptor de campo cercano en modo diferencial. Se realizaron ensayos sobre dos tipos de patrones: uno con fisuras perpendiculares a la superficie de rodadura y otro con fisuras que penetran el material a 25°, encontrándose diferencias en las señales. También se ensayaron dos métodos que podrían utilizarse para la compensación de la señal de lift-off en una inspección en servicio: uno aplicando ajuste de curva y el otro basado en redes neuronales artificiales. El método de redes neuronales permite, a la vez que compensa el lift-off, la evaluación automática del daño.

Palabras claves: Rieles, Corrientes inducidas, Head Check, Fatiga.

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. 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)^(2,3). 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. La producción de aceros más homogéneos, los 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: se 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.

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, con este método es difícil detectar defectos de tipo superficial como son las fallas producidas por FCR en estado incipiente, que sí pueden ser detectadas por el método de corrientes inducidas (CI)⁽³⁾. Se presentan en este trabajo los avances logrados en la investigación y detección de fisuras superficiales en rieles aplicando un dispositivo de laboratorio. Se comparan los resultados de inspeccionar ranuras perpendiculares a la superficie de rodadura con ranuras que penetran a 25° (ángulo medio de penetración de las fisuras tipo head check, las cuales son uno de los daños más importantes dentro de los producidos por la FCR). Por otro lado, se presentan dos métodos de compensación de lift-off: uno aplica un método de ajuste de curva y el otro aplica redes neuronales artificiales (RNA). El método de RNA permite también hacer una evaluación automática del daño.

2. Head checks

Los defectos denominados “head checks” (HC) 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); pero 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 que este ángulo de penetración es en promedio

$\alpha=25^\circ$. 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⁾.

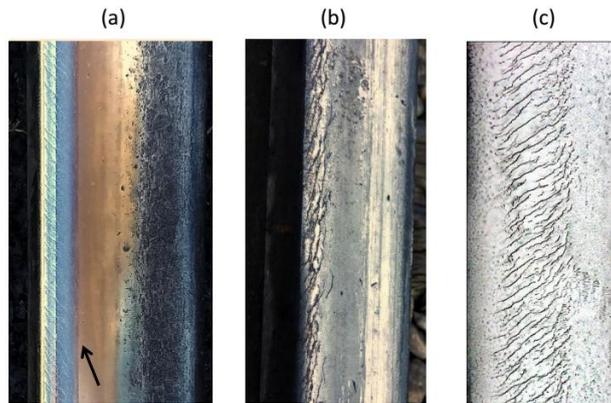


Figura 1. “Head checks” en esquina de trocha: (a) estado incipiente (línea Sarmiento, cerca de estación Haedo), (b) daño más avanzado (línea San Martín). (c) “head checks” en banda de rodadura ⁽³⁾.

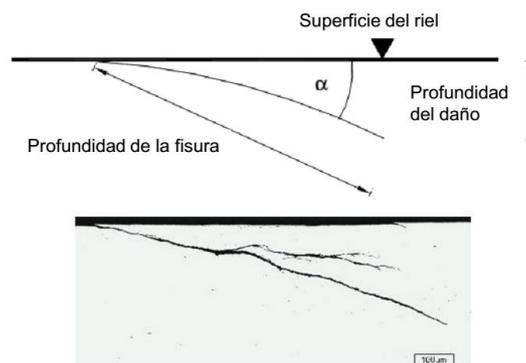


Figura 2. Detalle de HC incipiente ^(3,4).

3. Materiales y métodos

3.1 Equipo de CI

El equipo desarrollado utiliza la técnica emisor/receptor de campo cercano, como se indica en la figura 3. La bobina emisora, L_e , se encuentra en posición central y las bobinas receptoras, L_1 y L_2 , se disponen simétricamente.

El voltaje V_{dif} es afectado por las variaciones de lift-off durante el ensayo; esto puede afectar la correcta caracterización de los defectos. Los efectos producidos sobre V_{dif} por los cambios de lift-off pueden ser compensados utilizando el voltaje $V_{add} = V_{L1} + V_{L2}$ (ver figure 3). V_{add} puede ser interpretado como un parámetro de compensación, por medio del cual las amplitudes V_{dif} pueden ser correctamente restablecidas cuando son afectadas por variaciones del lift-off.

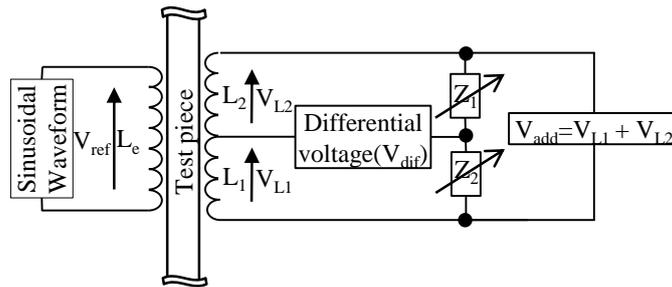


Figura 3. Equipo de CI. Modo diferencial, técnica emisor/receptor de campo cercano.

3.2 Patrones de ranuras

Se construyeron dos patrones sobre tramos de rieles con fisuras fabricadas por electroerosión con alambre de 0.2 mm. La figura 4 (a) muestra el patrón con los defectos perpendiculares a la banda de rodamiento del riel. Para el otro patrón, figura 4 (b), las fisuras son oblicuas formando un ángulo de penetración de 25° con respecto a la superficie de la cabeza del riel; este patrón busca simular un head check. Las profundidades de las ranuras son 1, 3, 5 y 7 mm.

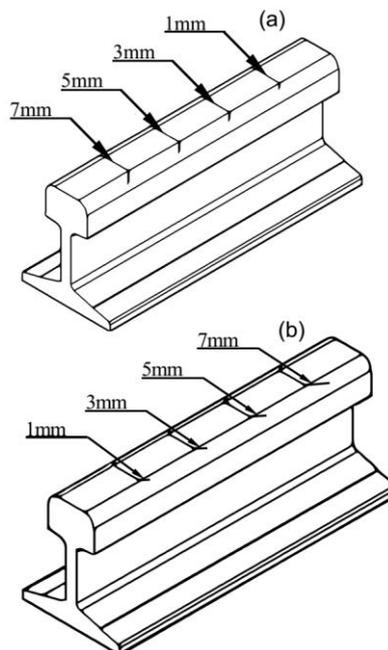


Figura 4. a) Patrón con fisuras perpendiculares. b) Patrón con fisuras oblicuas.

3.2 Clasificación de las señales y compensación de lift-off

3.3.1 Datos y señales

El voltaje diferencial V_{dif} , del puente de la figura 3, es amplificado, cuantificado, digitalizado y procesado obteniéndose la señal de salida que identificaremos como V_{out} . Como ejemplo, la figura 5 presenta la señal de salida para la fisura de 7 mm del patrón con fisuras perpendiculares, para el resto de las fisuras se obtuvieron señales análogas. Este patrón con fisuras perpendiculares, figura 4 (a), fue utilizado para estudiar la evaluación de las señales de fisuras y para implementar la compensación de lift-off con

los 9 valores de lift-off que se muestran en la figura 5; el valor de 0.4 mm corresponde al lift-off intrínseco de la bobina y las señales correspondientes a los otros lift-off se pueden considerar como señales disminuidas por la influencia del lift off. Con el fin de correlacionar el voltaje V_{add} con los valores de lift-off, se realizaron mediciones de V_{out} y V_{add} para todos los valores de lift-off de la figura 5 sobre una región libre de defectos; estos resultados se muestran en las figuras 6.

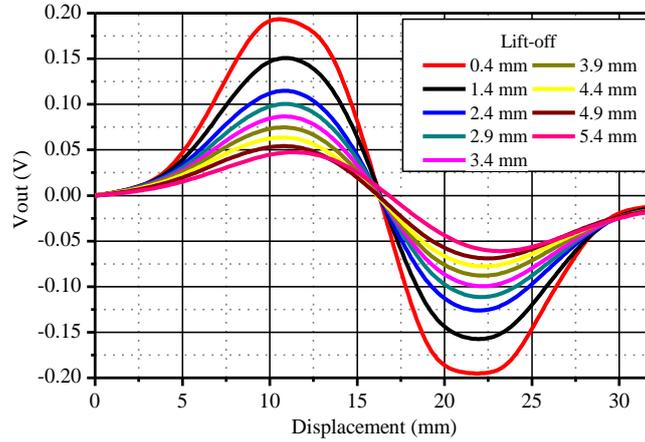


Figura 5. V_{out} para la fisura de 7 mm para todos los lift-off aplicados; patrón con fisuras perpendiculares.

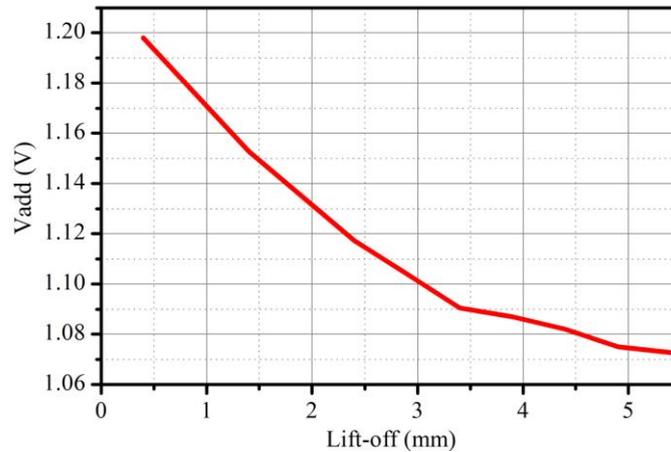


Figura 6. V_{add} como función del lift-off.

3.3.2 Compensación de lift-off por función de ajuste

Para compensar el lift-off aplicando una función de ajuste se procedió de la siguiente manera: Con los valores de V_{out} medidos para los diferentes lift-off y para cada ranura se calculó un coeficiente de compensación (k_{comp}) que es función del lift-off, que aquí identificaremos como d : $k_{comp}(d) = \text{Amp pico } V_{out}(0.4 \text{ mm}) / \text{Amp pico } V_{out}(d)$. Esta función “coeficiente de compensación” refleja como la componente inducida en las bobinas receptoras depende de la distancia lift-off: disminuye con d , como queda evidente en la figura 5 para la fisura de 7 mm. Con el coeficiente obtenido se puede restablecer la amplitud de la señal del defecto; para esto se necesita la función de ajuste

entre k_{comp} y V_{add} . Esta función resultó de la forma: $y = y_0 + A \cdot \exp(R_0 \cdot x)$, donde $y = k_{\text{comp}}$ y $x = V_{\text{add}}$. Para más detalles remitirse a⁽⁶⁾. Al aplicar el coeficiente de compensación a las señales (V_{out}) disminuidas en amplitud por el efecto del lift-off se pueden restaurar registrando V_{add} . Para esto se escala multiplicando por k_{comp} la señal disminuida en amplitud, aplicando la expresión $V_{\text{comp}} = k_{\text{comp}} \cdot V_{\text{out}}$.

3.3.3 Compensación de lift-off y clasificación de las señales aplicando RNA

Se usó una técnica de RNA para la clasificación de señales y como otro método para la compensación del lift-off, sobre el patrón con ranuras perpendiculares de la figura 4 (a). En esta aplicación, los datos de entrada de la RNA fueron: el máximo valor del voltaje V_{out} (V_{max} , máximos en la figura 5) y el valor efectivo del voltaje V_{add} ; ambos están clasificados de acuerdo a la profundidad del defecto. A diferencia del método de ajuste de curva presentado en 3.3.2⁽⁶⁾, esta RNA no requiere de los parámetros de la función que mejor ajusta los valores iniciales⁽⁷⁾. La estructura de la red neuronal empleada es un perceptrón multicapa feedforward con solo una capa oculta, como se muestra en la figura 7. Se utilizó el algoritmo Levenberg-Marquardt, el cual combina algoritmos de gradiente descendente y optimización de Gauss-Newton.

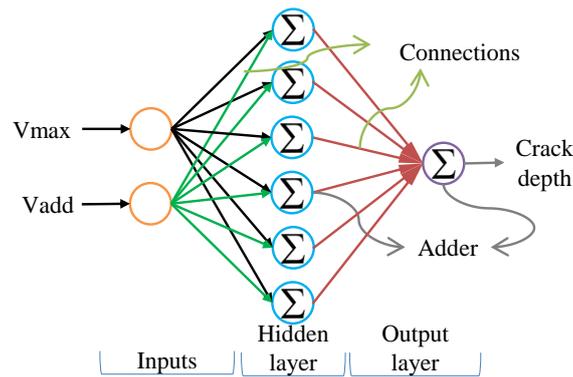


Figura 7. Feedforward RNA.

Con el fin de obtener un modelo adecuado para generalizar el problema sin overfitting o underfitting, se diseñó un algoritmo para determinar el número conveniente de neuronas en la capa oculta. El algoritmo usa validación cruzada, dividiendo el número total de muestras para entrenamiento, validación y prueba en 70%, 15% y 15%, respectivamente. El criterio para finalizar el entrenamiento fue la clasificación correcta de todas las muestras de entrenamiento y validación, o un tiempo de procesamiento máximo de 60 segundos. Una vez que la RNA ha sido entrenada, se analizó la tasa de acierto como una función del número de neuronas en la capa oculta: el porcentaje del número de muestras correctamente clasificadas respecto del número total de muestras. La profundidad de una ranura fue considerada correctamente clasificada si esta caía dentro de un error del 10%, respecto de la profundidad nominal de la misma. Para obtener el número óptimo de neuronal en la capa oculta su número fue variado entre 2 y 15, la RNA es entrenada para obtener la tasa de acierto para cada configuración. Con fines estadísticos, el entrenamiento de cada RNA se repitió 10 veces; utilizando las funciones de activación tangente hiperbólica (\tanh) y logarítmica (\log). Para la capa de salida, se usó la función de activación lineal (lin). Se estudió el resultado de la tasa de

acierto como una función del número de neuronas de la capa oculta para ambas funciones de activación probadas: Al comienzo de entrenamiento con dos neuronal, la tasa de acierto es baja y aumenta a medida que el número de neuronas aumenta. Luego, para una cantidad de neuronas entre 8 y 15 la tasa de acierto se mantiene casi constante y casi equivalente para ambas funciones, siendo apenas superior para la función log. Por lo tanto, se seleccionó una RNA con 8 neuronas en la capa oculta y la función de activación log-lin.

El desempeño de la RNA fue analizada con el método bootstrap, el cual realiza un remuestreo del conjunto de datos⁽⁸⁾. La aplicación del método bootstrap se planteó como necesaria por el hecho de que en el paso de entrenamiento de la RNA en el cual se usan algoritmos de gradiente descendente, estos pueden quedar atrapados en mínimos locales, resultando en un aprendizaje inadecuado⁽⁹⁾. Así, el uso del esquema de bootstrap permite mejores aciertos en las predicciones para cada entrenamiento de la RNA⁽¹⁰⁾. Se utilizó la técnica de bootstrap con remuestreo balanceado. De las permutaciones aleatorias de las muestras del conjunto original de tamaño N, se producen B nuevos conjuntos de datos. En este proceso, cada muestra aparecerá exactamente B veces, considerando todo el conjunto de datos generado. Es, por lo tanto, posible generar B modelos de RNA, correspondientes a los B conjuntos de datos generados. En ⁽¹⁰⁾ se recomienda que B se elija entre 50 y 200 con el fin de obtener un buen estimador del error estándar; en este trabajo la evaluación fue hecha con B=200.

Por otro lado, el entrenamiento de una RNA puede dar diferentes resultados de clasificación, dependiendo de las condiciones iniciales. Como se mencionó, para tener un panorama global del comportamiento de la RNA, se aplicó un esquema de entrenamiento con bootstrap, figura 8. Para diferentes inicializaciones de la RNA se utilizaron diferentes combinaciones de conjuntos de datos, tomando una parte del vector de muestra de V_{max} (el máximo valor del voltaje V_{out}) y el correspondiente V_{add} . El algoritmo de entrenamiento se detendrá solamente cuando se alcance el criterio de detención mencionado más arriba; y los resultados del entrenamiento fueron evaluados con el error cuadrático medio (ECM) para cada modelo.

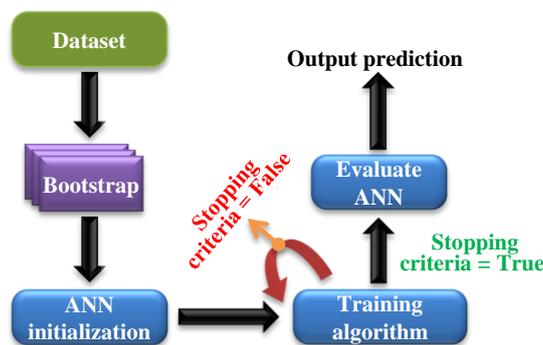


Figura 8. Esquema de entrenamiento usando bootstrap.

3.3.4 Evaluación de señales de fisuras con diferentes ángulos de penetración

Los patrones de la figura 4 fueron ensayados con la bobina sin lift-off adicional (0.4 mm, figura 5). Primero las señales de ambos patrones (con fisuras perpendiculares y con fisuras oblicuas a 25°) fueron analizadas y comparadas. Luego con los valores máximos de V_{out} (V_{max}) de las señales del patrón con fisuras perpendiculares, se ajustó una curva de calibración para las profundidades de las ranuras. Esta curva fue utilizada para evaluar las profundidades de las fisuras a 25°, tomando como valores de entrada sus V_{max} . Este procedimiento podría dar una estimación del error cometido si fisuras oblicuas al riel son evaluadas con un patrón de calibración perpendicular.

4. Resultados y discusión

4.1 Compensación de lift-off y clasificación de las señales

La compensación de las señales disminuidas por el efecto del lift-off aplicando el ajuste de curvas arrojó diferencias entre el 20% y el 3%, respecto de la señal sin disminución (es decir con el lift-off intrínseco de la bobina). Estas diferencias generalmente fueron por exceso y en todos los casos se lograron diferenciar todas las ranuras sin presentarse superposiciones entre las señales de las ranuras correspondientes a las diferentes profundidades. Como es sabido, la evaluación en este caso no es automática, sino que se hace observando las señales.

Con la aplicación de RNA, para las condiciones de trabajo presentadas, la incerteza del método de clasificación fue elegida como la mitad del valor promedio del ECM de la tabla 1, esto se muestra en la tabla 2. Las cifras decimales presentadas en la tabla 1 están sólo a modo de ejemplo de la salida de cálculo. Con este método la compensación del lift-off y la clasificación de las señales se hacen en forma automática aplicando inteligencia artificial.

Tabla 1. Bootstrap con remuestreo balanceado, salidas de cálculo.

Profundidad nominal (mm)	Profundidad media estimada (mm)	ERC promedio (mm)
1	1.007	0.096
3	3.006	0.123
5	5.030	0.157
7	6.965	0.159

Tabla 2. Incerteza del método.

Profundidad nominal (mm)	Profundidad media estimada (mm)	Incerteza del método (mm)
1	1.01	0.05
3	3.01	0.06
5	5.03	0.08
7	6.96	0.08

4.2 Evaluación de señales de fisuras con diferente ángulo de presentación

Las señales de salida V_{out} de los patrones de ambos patrones de calibración se presentan superpuestas en la figura 9. Si se consideran los máximos de V_{out} (V_{max}), sólo las señales de las fisuras de 3 mm son similares; la amplitud de la señal de la fisura perpendicular de 1 mm es el doble del valor correspondiente al defecto oblicuo. En el caso de las ranuras de 5 y 7 mm, V_{max} para las fisuras a 25° es 12-13% menor que el valor de las señales de las fisuras perpendiculares.

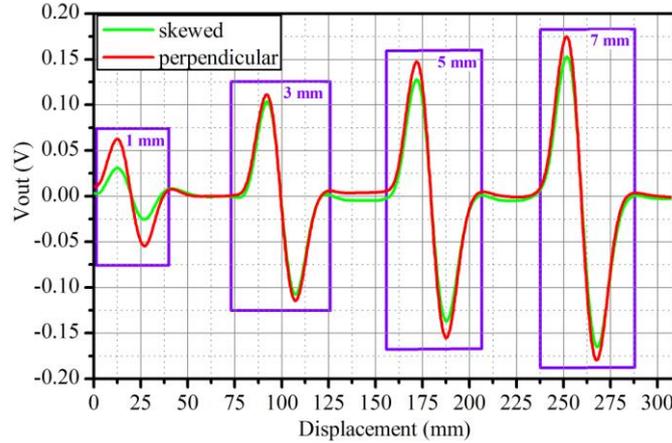


Figura 9. Salida del equipo de CI para los patrones estudiados.

En general los patrones de calibración para ensayos de CI se fabrican con fisuras perpendiculares a la superficie del mismo. Por lo tanto, si un patrón perpendicular, tal como el de la figura 4 (a), fue usado como patrón de calibración para la evaluación de daño tipo HC, figure 4 (b), los resultados de la figura 9 podrían ser utilizados para estimar el error. Por esto, una curva de calibración lineal “por partes” fue construida utilizando las señales V_{max} del bloque perpendicular, considerando la profundidad de la ranura en función de V_{max} de la curva roja en figura 9; esta curva de calibración se muestra en la figura 10.

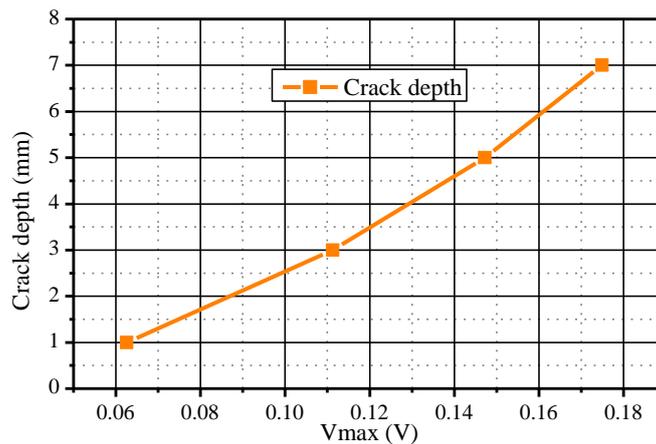


Figura 10. Curva de calibración lineal segmentada para el patrón perpendicular.

Para construir la curva segmentada en la figura 10, se consideraron relaciones lineales entre pares de ranuras consecutivas. Con estas tres relaciones lineales y tomando como entradas los valores de V_{max} correspondientes a las ranuras a 25° (máximos de la curva

verde en la figura 9), las profundidades de las fisuras oblicuas fueron evaluadas (tabla 3). Se debe notar que el defecto oblicuo de 1 mm está afuera del rango de aplicación de la curva de la figura 10. Si no se tiene un patrón con fisuras perpendiculares con fisuras menores a 1 mm, se debe hacer una extrapolación hacia valores más pequeños de V_{max} . ¿Qué función de extrapolación se debería usar? o más aun, ¿es esa extrapolación válida? Excepto para fisura de 3 mm, el daño real de las fisuras oblicuas es subestimado cuando se evalúan con un bloque de calibración perpendicular.

Tabla 3. Evaluación de las fisuras a 25° (figura 4 (b)) con la curva de calibración para ranuras perpendiculares (figura 4 (a)).

Profundidad nominal de fisuras a 25° (mm)	1	3	5	7
Evaluación de fisuras a 25° (mm)	-	2.7	3.9	5.4

5. Conclusiones

En un dispositivo experimental que aplica el método de CI con la técnica de campo cercano en modo diferencial, se probaron dos métodos de compensación de lift-off y de evaluación de las señales provenientes de un patrón de ranuras fabricado sobre un cupón de riel: Uno de los métodos aplica un ajuste de curva para compensar el lift-off y la clasificación de las señales de los defectos se hace en forma convencional (es decir observando el desarrollo de las señales en una pantalla o gráfico). El otro es un método de aprendizaje automático basado en RNA, aquí tanto la compensación del lift-off como la clasificación se hace en forma automática. Con ambos métodos se pudo compensar el lift-off y evaluar las señales sin ambigüedad.

Las señales obtenidas de un cupón de riel con ranuras perpendiculares fueron comparadas con las señales obtenidas de otro cupón de riel con fisuras penetrando el material a 25° (patrón oblicuo que simula el ángulo de penetración medio del daño de FCR tipo HC). Ambos patrones tienen fisuras con las mismas profundidades nominales: 1, 3, 5 y 7 mm. Sólo las señales de las fisuras de 3 mm de profundidad parecen ser equivalentes; la amplitud de la señal de la fisura oblicua de 1 mm resultó la mitad que la correspondiente a la fisura perpendicular de la misma profundidad; y las señales de los defectos oblicuos de 5 y 7 mm fueron 12-13% menores que las señales de las fisuras perpendiculares.

Referencias

1. E Magel, '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. Z Popović, V Radović, 'Rolling contact fatigue of rails', The III Int. Scientific and Professional Conference, CORRIDOR 10, Belgrade, Serbia, 2016. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/299563338_ROLLING_CONTACT_FATIGUE_OF_RAILS. Accedido 11/04/2018.
3. A Dey, H M Thomas and R Pohl, 'The important role of eddy current testing in railway track maintenance', 17th WCNDT, Shanghai, China, 25-28 October 2008.

4. R Pohl, H M Thomas and R Casperson, '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. M Gutiérrez, J Fava, T Di Fiore, M Ruch, R Romero and J Vorobioff, 'Development of a differential test device for eddy current rail inspection', 12th European Conference on Non-Destructive Testing, Gothenburg, Sweden, June 11-15, 2018.
7. J Hertz, A Krogh and R Palmer, 'Introduction to the theory of neural computation', Addison-Wesley Longman Publishing Co, Boston, MA, USA, 1991.
8. B Efron and R J Tibshirani, 'An introduction to the bootstrap', Chapman and Hall, London, UK, 1993.
9. P Baldi and K Hornik, 'Neural networks and principal component analysis: learning from examples and local minima', Neural Networks, Vol 2, No 1, pp 53-58, 1989.
10. P Hall, 'The bootstrap and edgeworth expansion', Springer-Verlag, New York, USA, 1992.