

DOI (Asignado por la editorial. No diligenciar por el autor.)

Artículo investigación

**Sensibilidad de señales de corrientes inducidas aplicadas a la
detección de defectos y estados microestructurales en materiales
ferroviarios.**

**Sensitivity of Eddy Current Signals Applied to the Detection of Defects
and Microstructural States in Railway Material**

D. Villa¹, J. Jaramillo^{1, 2}

¹ Grupo de Investigación en Innovación en Energías GIEN, Institución Universitaria Pascual Bravo, Medellín Colombia

²Tribology and Surfaces Group, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia

*Autor de correspondencia: d.villa153@pascualbravo.edu.co

Resumen

Este estudio presenta una evaluación experimental en laboratorio de la sensibilidad de la técnica de Corrientes Inducidas (Eddy Current Testing, ECT) para la detección de defectos superficiales y variaciones microestructurales en acero de riel R260. Se utilizaron sondas estandarizadas sometidas a tratamientos térmicos de normalizado y temple, con el propósito de obtener microestructuras representativas de tipo perlítico y martensítico, respectivamente. Además, se mecanizaron ranuras calibradas con profundidades entre 0,1 y 2 mm para simular discontinuidad.

La caracterización microestructural se realizó mediante microscopía óptica, mientras que los ensayos de microdureza evidenciaron un incremento significativo desde 334 HV en condición normalizada hasta 956 HV en condición templada. Las mediciones por ECT se efectuaron en un rango de frecuencias de excitación entre 100 y 1000 kHz, empleando un sistema OmniScan MX equipado con una sonda tipo arreglo (MagnaFORM). Se implementó un diseño experimental factorial para evaluar la influencia de la frecuencia y de la condición microestructural sobre la respuesta de la se.

Los resultados mostraron que la amplitud de la señal aumenta tanto con la profundidad de las ranuras como con la frecuencia de excitación, confirmando la alta sensibilidad del método frente a discontinuidades geométricas. Asimismo, se observará una relación inversa entre la dureza del material y la respuesta de impedancia. Las muestras normalizadas presentaron señales más estables y homogéneas, mientras que las plantillas evidenciaron mayor atenuación y dispersión. Estos hallazgos respaldan el uso del ECT como herramienta para la evaluación de integridad estructural y monitoreo microestructural.

Objetivo: Evaluar en laboratorio la sensibilidad de la técnica de Corrientes Inducidas (Eddy Current Testing, ECT) para detectar defectos superficiales y variaciones microestructurales en acero de riel R260.

Metodología: Se ensayaron probetas estandarizadas con tratamientos térmicos de normalizado y temple para obtener microestructuras perlítica y martensítica. Se mecanizaron ranuras calibradas (0,1–2 mm) como discontinuidades controladas. La microestructura se caracterizó por microscopía óptica y la microdureza mostró un aumento de 334 HV (normalizado) a 956 HV (templado). Las mediciones ECT se realizaron a 100–1000 kHz con un sistema OmniScan MX y sonda tipo arreglo (MagnaFORM), mediante un diseño factorial para evaluar el efecto de la frecuencia y la condición metalúrgica.

Resultados: La amplitud de la señal aumentó con la profundidad de la ranura y con la frecuencia de excitación, evidenciando sensibilidad a discontinuidades geométricas. Se observó una relación inversa entre la dureza y la respuesta de impedancia: las muestras normalizadas presentaron señales más estables, mientras que las templadas exhibieron menores valores de impedancia y mayor atenuación.

Conclusiones: ECT mostró potencial para detectar grietas superficiales y, de forma indirecta, diferenciar cambios microestructurales en aceros ferroviarios, aportando a estrategias de mantenimiento predictivo e integridad de rieles.

Palabras claves: corrientes inducidas; ensayo no destructivo; acero de riel; microestructura; detección de defectos.

Abstract

This study presents an experimental laboratory evaluation of the signal sensitivity of Eddy Current Testing (ECT) for detecting surface defects and microstructural variations in R260 rail steel. Standardized specimens were subjected to normalizing and quenching heat treatments to obtain representative pearlitic and martensitic microstructures, respectively. Additionally, calibrated slots with depths ranging from 0.1 to 2 mm were

Microstructural characterization was carried out using optical microscopy, while microhardness measurements revealed a significant increase from 334 HV in the normalized condition to 956 HV in the quenched condition. ECT measurements were performed over an excitation frequency range of 100 to 1000 kHz using an OmniScan MX system equipped with a MagnaFORM array probe. A factorial experimental design was implemented to evaluate the influence of excitation frequency and microstructure

The results showed that signal amplitude increases with both slot depth and excitation frequency, confirming the high sensitivity of the method to geometric discontinuities. Furthermore, an inverse relationship between material hardness and impedance response was observed. Normalized samples exhibited more stable and homogeneous signals, whereas quenched samples showed greater attenuation and dispersion. These findings support the use of ECT not only for surface crack detection but also as an indirect tool for assessing microstructural changes in railway steels, contributing to improve

Objective: To evaluate, under laboratory conditions, the signal sensitivity of Eddy Current Testing (ECT) for detecting surface defects and microstructural variations in R260 rail steel

Methodology: Standardized specimens were tested after normalizing and quenching heat treatments to obtain pearlitic and martensitic microstructures, respectively. Calibrated slots (0.1–2 mm) were machined as controlled discontinuities. The microstructure was characterized by optical microscopy, and microhardness increased from 334 HV (normalized) to 956 HV (quenched). ECT measurements were performed at 100–1000 kHz using an OmniScan MX system with an array probe (MagnaFORM), applying a factorial experimental design to assess the effects of excitation frequency and metallurgical condition on the signal response.

Results: Signal amplitude increased with slot depth and excitation frequency, demonstrating sensitivity to geometric discontinuities. An inverse relationship was observed between material hardness and impedance response: normalized specimens exhibited more stable signals, whereas quenched specimens showed lower impedance values and greater attenuation.

Conclusions: ECT demonstrated potential not only for detecting surface cracks but also, indirectly, for differentiating microstructural changes in railway steels, supporting predictive maintenance strategies and rail integrity management.

Keywords: eddy currents; non-destructive testing; rail steel; microstructure; defect detection.

Introducción

La inspección y el mantenimiento de rieles ferroviarios se constituyen en una actividad fundamental para garantizar la seguridad y la eficiencia del transporte ferroviario moderno. Una herramienta muy útil para apoyar los procesos de inspección, se relacionan con los ensayos no destructivos (END), manera particular métodos como el ensayo ultrasonido y las corrientes de Eddy, han evolucionado como herramientas clave para la detección temprana y la clasificación precisa de defectos superficiales y subsuperficiales en los rieles, permitiendo intervenciones preventivas y optimización de los planes de mantenimiento[1], [2], [3].

Uno de los problemas actuales que enfrentan los sistemas ferroviarios es la formación periódica de irregularidades superficiales en el riel, fenómeno identificado como corrugación de paso corto (short pitch corrugation), el cual ha sido asociado con efectos indeseables como vibraciones y desgaste del riel [4], [5], [6]. Este tipo de corrugación puede abordarse mediante diversas actividades de mantenimiento ferroviario, incluyendo el esmerilado de rieles, la modificación del coeficiente de fricción[7], [8], [9], [10], el incremento de la dureza del riel [11], la reducción de la rigidez de la zona de contacto [12], [13] , y cambios en los modos de operación.

Durante el proceso de interacción rueda-riel en el transporte ferroviario, el riel es uno de los componentes con mayores solicitaciones y esfuerzos que se producen tanto en condiciones de transporte de pasajeros como de carga. Este componente está sujeto a diferentes influencias generadas por las condiciones de mantenimiento previo, frecuencia de uso, cargas dinámicas entre otros factores operativos tales como variaciones de temperatura, humedad, contaminación, fatiga residual, los cuales inciden directamente en su disponibilidad y vida útil [14], [15]. Con el aumento reciente en las condiciones de velocidad y las cargas de los trenes, estos elementos experimentan mayores tensiones de contacto en la superficie de rodadura. En tales condiciones pueden generarse defectos de fatiga de contacto localizada entre la rueda y la cabeza del riel, originando grietas o desprendimientos superficiales. Este fenómeno es conocido como Rolling Contact Fatigue (RCF) o «fatiga por contacto de rodadura»[16], [17], [18], [19]. Las grietas pueden iniciarse en la superficie o cerca de ella, y bajo cargas repetidas pueden

propagarse hacia el interior del material, comprometiendo la integridad del riel y provocando fallas prematuras si no se gestionan adecuadamente [20].

El uso de ensayos no destructivos relacionados con las corrientes de Eddy ha permitido a detección temprana de fallas superficiales e internas, mejorando la seguridad y la eficiencia del mantenimiento ferroviario. La técnica de corrientes de Eddy ha sido utilizada para la detección de grietas y daños superficiales cercanos a la superficie. La combinación con sistemas automatizados y algoritmos avanzados de procesamiento de señales, ha incrementado la sensibilidad, la velocidad y la fiabilidad de la inspección, permitiendo intervenciones preventivas antes de que los defectos evolucionen a fallas críticas.[21], [22]

En este contexto, el presente estudio realiza una evaluación experimental en laboratorio de la sensibilidad de la técnica de corrientes inducidas (ECT) para la detección de discontinuidades superficiales controladas y la identificación indirecta de variaciones microestructurales en acero de riel R260. Para ello, se comparan respuestas de señal en muestras normalizadas y templadas, considerando diferentes frecuencias de excitación, con el fin de aportar criterios técnicos que apoyen estrategias de mantenimiento predictivo e integridad de rieles.

Metodología

Composición química de las muestras

Las muestras corresponden a material extraído de un riel de referencia R260. En la **Tabla 1** se presenta la composición química del riel, obtenida mediante la técnica de espectroscopía de emisión óptica.

Tabla 1. *Análisis de composición Química Riel R260 (wt.%).*

(C)	(Si)	(Mn)	(P)	(S)	(Cr)	(Mo)	(Ni)	(Cu)	(V)	(W)
0.692	0.249	1.093	0.021	0.016	0.045	0.0046	0.017	0.050	0.0018	0.0028

Fuente: elaboración propia.

Muestra patrón con entallas (simulación de grietas)

Una sección de riel nuevo de referencia R260 fue extraída con el propósito de mecanizar un estándar mediante un proceso de CNC entallas o ranuras con profundidades específicas con el propósito de establecer relaciones entre la profundidad de cada ranura y las señales de voltaje de cada medición (ver **Figura 1**). Esta muestra obtenida de un estado microestructural original, fue mecanizada en CNC con ranuras a 2; 1,5; 1; 0,5 y 0,2 mm de profundidad con ancho igual a 1 mm en cada una de ellas. Sirve como referencia en la comparación de los datos obtenidos en las zonas no ranuradas y para la validar la detección de grietas superficiales. Las ranuras realizadas en la muestra permiten observar cómo las corrientes de Eddy detectan las variaciones geométricas producto del cambio de impedancia en la señal.

Fuente: elaboración propia.

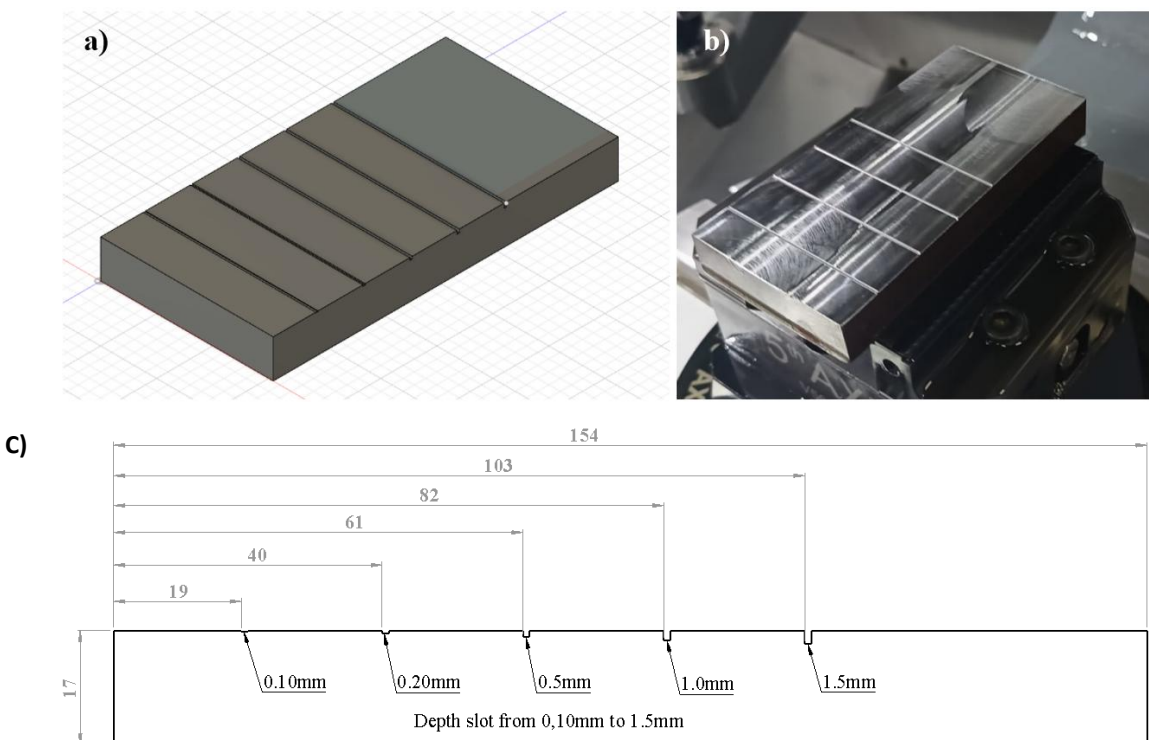


Figura 1. Muestra patrón ranurada para simulación de grietas: (a) Probeta con ranuras. (b) Montaje experimental. (c) Geometría y profundidades de ranuras

Muestras sometidas a tratamiento térmico

Dos muestras de riel nuevo de referencia R260 fueron mecanizadas en CNC con el propósito de alcanzar las dimensiones finales mostradas en la

Figura 2. Estas secciones o muestras se utilizaron para realizar tratamientos térmicos, específicamente de temple y normalizado, para obtener microestructuras martensíticas y perlíticas respectivamente, así como para fabricar un bloque de calibración destinado al ajuste de señales en ensayos no destructivos (END).

Fuente: elaboración propia.

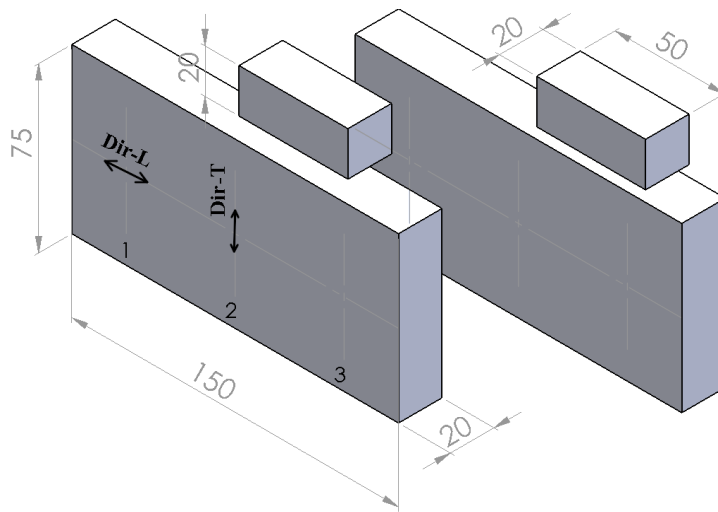


Figura 2. Dimensiones de muestras sometidas a temple y normalizado.

Extracción muestras metalográficas

Posterior a la obtención de los tratamientos térmicos y después de obtener las mediciones utilizando el equipo de corrientes de Eddy, se procedió a analizar los testigos extraídos de cada muestra templada y normalizadas para realizar la preparación Metalográfica.

Preparación muestras metalográficas

Las probetas fueron encapsuladas en baquelita fenólica para su protección. Luego fueron desbastadas con diferentes papeles Si-C a 250 rpm. El pulido se realizó mediante paños con suspensiones de diamante de 3 y 1 μm . Ver **Tabla 2**. Etapas de pulido metalográfico.

Tabla 2

Tabla 2. *Etapas de pulido metalográfico*

Etapas de pulido	Tipo de lija
1	Grano 180
2	Grano 240
3	Grano 360
4	Grano 400
5	Grano 600
6	Grano 1000
7	Grano 1200-1500
8	Grano 2000
9	Paños

Fuente: elaboración propia.

Caracterización microscopia óptica.

Para la caracterización microestructural se empleó un microscopio óptico metalográfico Axioscope 5 de Carl Zeiss, ubicado en el Centro de Manufactura Avanzada del SENA. El

equipo se operó con objetivos de 10× y 20×, seleccionados con el propósito de optimizar la resolución y el contraste durante la observación de las características microestructurales. Las muestras fueron sometidas a un proceso de preparación metalográfica que incluyó desbaste, pulido y posterior ataque químico con Nital al 3 %. Este reactivo permitió resaltar los contornos de grano y las fases presentes en el material, asegurando una adecuada definición de la microestructura para su análisis posterior.

Mediciones de micro dureza.

Se llevaron a cabo ensayos de microdureza Vickers (HV) con el fin de evaluar las variaciones de esta propiedad mecánica posteriores a los tratamientos térmicos aplicados. Las mediciones se realizaron utilizando un microdurómetro Shimadzu HVM-G, con una resolución de ± 1 HV, empleando una carga estándar de HV 0.025 (2.45 mN). Para cada muestra se efectuaron diez indentaciones, garantizando así la repetibilidad y confiabilidad de los resultados obtenidos.

Condiciones de medición por corrientes inducidas

Los ensayos de corrientes inducidas (ECT) se realizaron con un equipo de referencia OmniScan MX. Se utilizó el módulo ECA4-32, junto con el cable de conexión universal y la sonda MagnaFORM con encoder, según se muestra en la

Fuente: elaboración propia.. Estos componentes, recomendados por el fabricante, permiten la inspección de materiales metálicos ferromagnéticos y no ferromagnéticos. **La Tabla 3** presenta las especificaciones de la sonda ECA (Eddy Current Array).

Tabla 3. Especificaciones de la Sonda (ECA)

ECA Especificaciones de la Sonda	
Modelo de la sonda	E400110
Número de canales	32-64
Ganancia	35 dB
Longitud de la sonda	150 mm
Cobertura de la sonda	64 mm
Rango de frecuencia	50KHz-1MHz
Aplicación	Inspección de Acero al carbono
Lift-off	3.0 mm
Tipo de conector	Lemo 16
Tipo de escaneo	Encoder
Resolución de encoder	5.06 steps/mm
Área e escaneo	250 mm

Fuente: elaboración propia.

Fuente: elaboración propia.

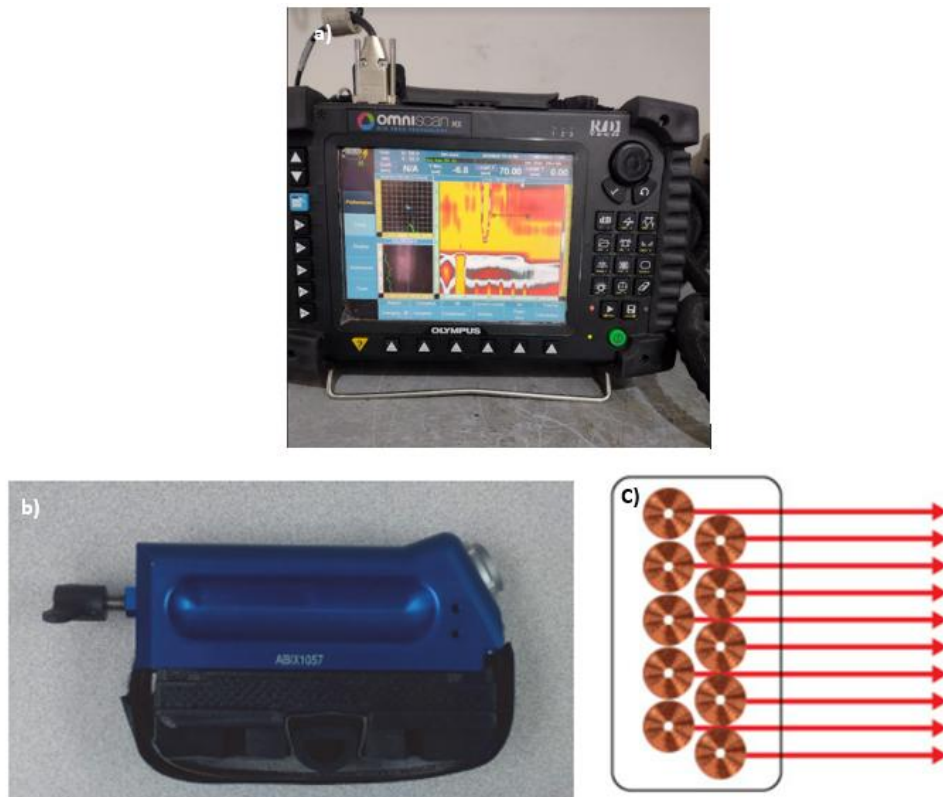


Figura 3. (a) Equipo de corrientes inducidas. (b) Sonda ECT. (c) Arreglo de sondas.

Condiciones de Calibración

Tabla 4. *Combinaciones experimentales de medición*

Condición de calibración	Parámetros configurados	Objetivo técnico	Resultado esperado
Ajuste mediante patrón del fabricante	Frecuencias: 100 kHz, 200 kHz y 500 kHz	Calibrar las lecturas de impedancia del equipo en distintos rangos de penetración electromagnética	Estabilidad y repetibilidad en la respuesta de impedancia
Compensación del efecto <i>lift-off</i>	Ajuste fino de fase y amplitud	Minimizar errores por variaciones en la distancia sonda–superficie	Optimización de sensibilidad y reducción de ruido en señal
Validación en panel “Sizing”	Medición de profundidad de ranuras patrón	Verificar exactitud en la estimación de profundidad de discontinuidades	Concordancia con valores de

Fuente: elaboración propia.

Parámetros de ensayo y diseño experimental en las mediciones

Se implementó un diseño experimental factorial considerando dos factores principales: frecuencia de medición (100, 200 y 500 kHz) y tipo de probeta (normalizada, templada y ranurada). Para cada combinación se realizaron tres réplicas, con el fin de evaluar la influencia de estas variables en la respuesta del ensayo, particularmente en la sensibilidad a defectos y en la detección de variaciones microestructurales. En total se evaluaron nueve combinaciones experimentales, correspondientes a las tres frecuencias aplicadas a cada uno de los tres tipos de probeta, las cuales se verifican en la **Tabla 5**.

Tabla 5. *Combinaciones experimentales de medición*

Experimento	Frecuencia de medición (kHz)	Tipo de probeta
1	100	Normalizada
2	100	Templada
3	100	Ranurada
4	200	Normalizada
5	200	Templada
6	200	Ranurada
7	500	Normalizada
8	500	Templada
9	500	Ranurada

Fuente: elaboración propia.

Resultados

Microestructura

En las Figuras 4a) y 4b) se observan micrografías de las probetas Sometidas a tratamiento térmico de normalizado y templado.

Fuente: elaboración propia

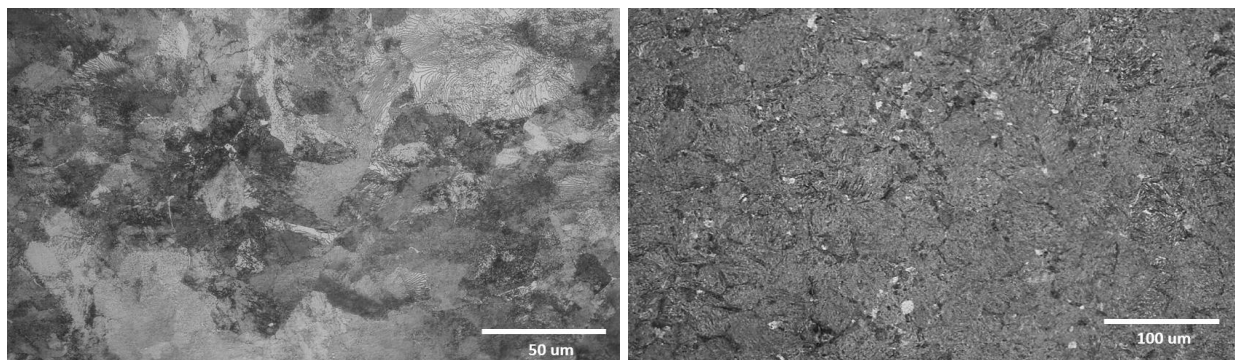


Figura 4. a). Microestructura perlítica (TT-Normalizado); b) Microestructura martensítica (TT-Templado)

En las Figuras 4(a) y 4(b) se observan micrografías de probetas sometidas a tratamiento térmico de normalizado y temple. En la Figura 4(a) se aprecia una microestructura perlítica con disposición lamelar y variaciones en el espaciamiento interlamelar; las regiones más claras corresponden a perlita con mayor espaciamiento, mientras que las zonas más oscuras muestran un espaciamiento más fino. En la Figura 4(b) se observa una microestructura martensítica caracterizada por morfología acicular.

Medición de Dureza

Los resultados de microdureza muestran un incremento progresivo en función del tratamiento térmico aplicado. La muestra en estado de entrega presentó un valor promedio de 274.6 HV. La condición normalizada registró una dureza promedio de 334.4 HV. En contraste, la muestra templada alcanzó un valor promedio significativamente mayor, de 955.9 HV.

Las desviaciones estándar obtenidas fueron bajas en todas las condiciones (aproximadamente 3–4 HV en normalizado y templado), lo que indica buena repetibilidad y homogeneidad en las mediciones realizadas. La **Tabla 6** muestra las mediciones realizadas de manera aleatoria sobre la superficie de las probetas.

Tabla 6. Mediciones de dureza a muestras templadas y normalizadas

Toma de dureza	Estado entrega (HV)	Normalizada (HV)	Templada (HV)
1	278	337	955
2	273	332	960
3	280	336	950
4	278	342	957
5	272	334	960
6	274	331	958

7	274	333	960
8	277	331	955
9	270	338	952
10	270	330	952
Desviación estándar	274.6	3.61	3.51
Dureza promedio	3.32	334.4	955.9

Fuente: elaboración propia

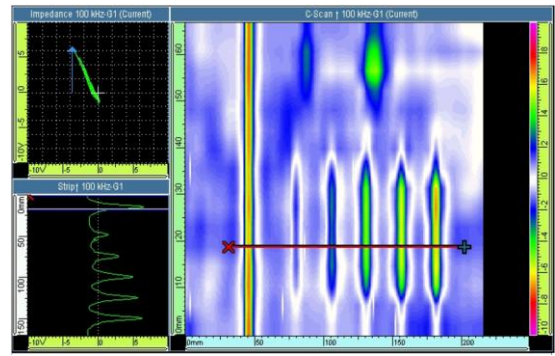
Resultados de la calibración del equipo de corrientes inducidas

Se utilizó el equipo OmniScan MX (Olympus), realizando la calibración mediante patrones de referencia del fabricante, como se muestra en la **Figura 5. Calibración de equipo OmniScan MX. A) Patrón de calibración del fabricante del equipo, medición con sonda MagnaFORM. B) Calibración realizada a 100 kHz de frecuencia** **Figura 5**. Para la configuración, se ajustaron parámetros clave en función de las características de las probetas y los resultados esperados. La configuración utilizada se resume en la Tabla 7

Fuente: elaboración propia



a)



b)

Figura 5. Calibración de equipo OmniScan MX. A) Patrón de calibración del fabricante del equipo, medición con sonda MagnaFORM. B) Calibración realizada a 100 kHz de frecuencia

Tabla 7. Parámetros de calibración a 100 kHz

Parámetro	Valor
Frecuencia de la señal	100.1 kHz
Ganancia	35.0 dB
Ángulo de fase	0.0°
Filtros de banda	No aplicados

Fuente: elaboración propia

El proceso de calibración fue realizado manualmente. Para las mediciones se estableció una velocidad de medición constante de 5 mm/s. Además, el equipo permitió realizar una medición utilizando un sistema de compensación dinámica y automática de lift-off, minimizando la incertidumbre asociada a este parámetro. Este mismo proceso fue realizado para las otras frecuencias de medición, conservando la configuración de Ganancia, Ángulo de fase y Filtros de banda.

Detección de grietas simuladas en muestras de riel mediante ensayo no destructivo (END)

La Figura 6 presenta la configuración experimental del ensayo no destructivo por corrientes Eddy (ENDCE) empleada para evaluar una probeta metálica ranurada. La muestra incorpora ranuras calibradas que simulan discontinuidades superficiales controladas. La probeta se montó sobre un soporte de madera para permitir un desplazamiento uniforme de la sonda y reducir interferencias magnéticas externas. El escáner manual tipo carrito, equipado con una sonda MagnaFORM y un encoder, permitió un posicionamiento preciso durante el barrido. Las señales adquiridas fueron procesadas mediante el equipo OmniScan MX, el cual generó gráficos de barrido y mapas C-scan para visualizar las variaciones de impedancia asociadas a las discontinuidades.

De acuerdo con la Figura 7, al pasar sobre las ranuras se registraron picos significativos de voltaje, asociados a incrementos en la impedancia debido a la presencia de la discontinuidad. La magnitud del pico aumentó con la profundidad de la ranura, evidenciando la sensibilidad del sistema frente a discontinuidades superficiales[3].

Asimismo, se observó que el aumento de la frecuencia de excitación y la reducción de la distancia sonda–superficie incrementan la sensibilidad de la señal. En particular, la ranura de 2 mm mostró un aumento del voltaje pico de aproximadamente 1.2 V a 3.5 V. La Tabla 5 presenta los voltajes medidos para cada profundidad de ranura a diferentes frecuencias de excitación.

Fuente: elaboración propia

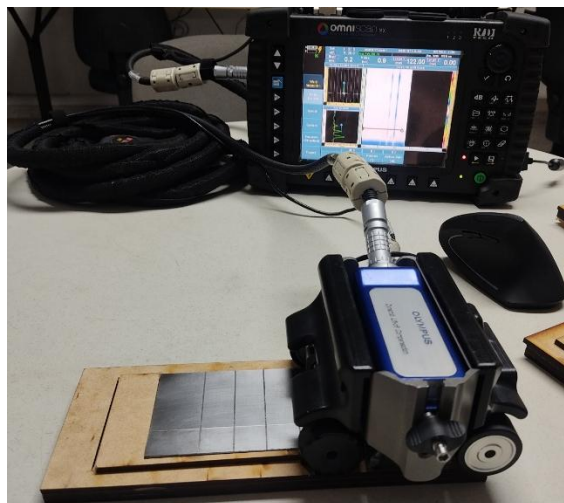


Figura 6. Disposición experimental para ENDCE en probeta ranurada

Fuente: elaboración propia

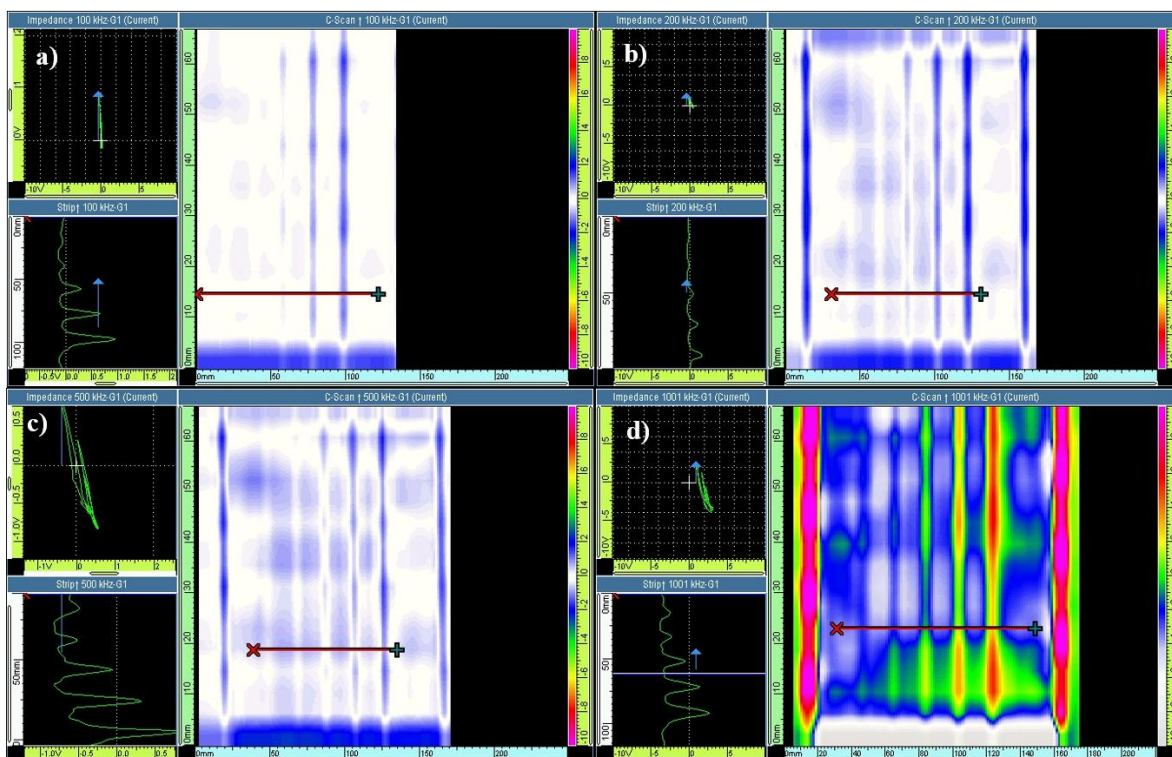


Figura 7. Resultados de medición de ET en probeta ranurada. a) 100kHz de frecuencia. b) 200kHz de frecuencia. d) 500 kHz de frecuencia. e) 1000 kHz de frecuencia

Tabla 8. Voltajes medidos para cada frecuencia y profundidad de ranura.

ECT Medición de señal	Prof de ranuras_Vmax[v]				
Frecuencia [kHz]	0,1mm	0,2mm	0,5mm	1mm	2mm
100	1	0,5	0,25	0,20	0,1
200	1,5	1	0,5	0	0
500	2	1,5	0,9	0,5	0,25
1000	5	4	3,5	2	1,5

Fuente: elaboración propia

Medición por corrientes inducidas (ECT) en muestras sometidas a tratamiento térmico

La Figura 8 muestra la configuración experimental y la posición de la sonda MagnaForm respecto a las muestras sometidas a tratamientos térmicos de normalizado y temple. En la imagen se observa la guía de madera utilizada para estabilizar la probeta y reducir efectos magnéticos externos, garantizando mediciones precisas y repetibles.

Fuente: elaboración propia

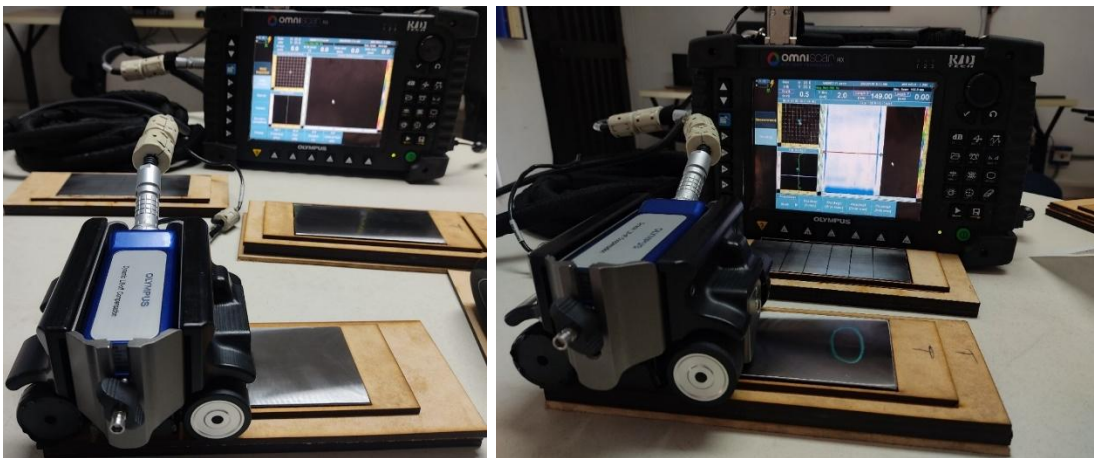


Figura 8. Configuración de inspección: muestra estandarizada y sonda MagnaForm.

Probeta Normalizada

La Figura 9 muestra los resultados de las mediciones realizadas sobre la muestra normalizada a diferentes frecuencias, evidenciando un comportamiento estable de la señal de corrientes inducidas. El análisis del plano de impedancia, indicado en el recuadro superior izquierdo, revela valores bajos y consistentes en ambos ejes para las tres mediciones efectuadas. Asimismo, el modo Strip Chart View, ubicado en el recuadro inferior izquierdo, confirma que la señal presenta una amplitud lineal y uniforme durante

el desplazamiento de la sonda, sin perturbaciones asociadas al proceso de escaneo. Las únicas variaciones registradas corresponden a los extremos de la probeta, asociadas al efecto de borde.

Fuente: elaboración propia

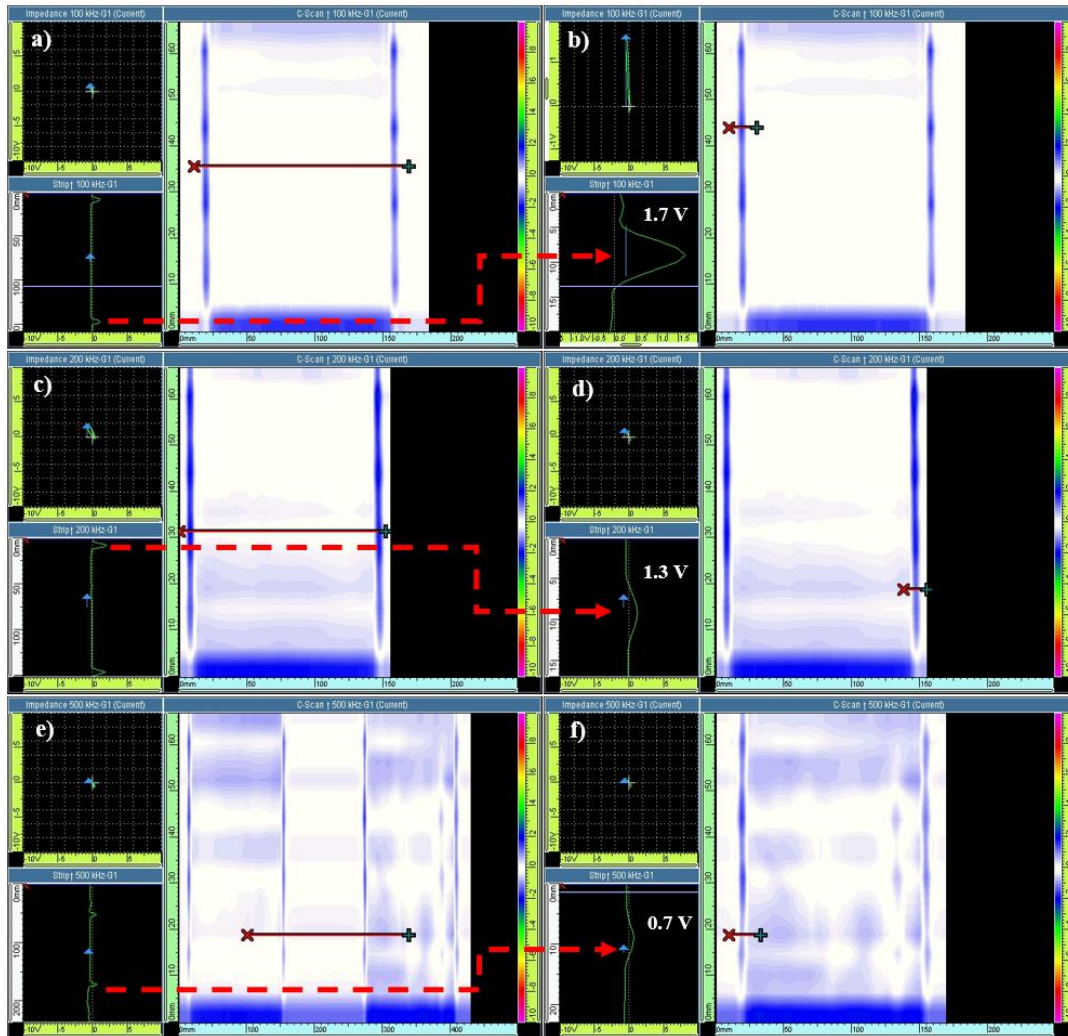


Figura 9. Resultados de la medición por ECT en una probeta patrón estandarizada. a) Señal a una frecuencia de 100 kHz, b) Ampliación (zoom) del Strip Chart a 100 kHz, c) Señal a una frecuencia de 200 kHz, d) Ampliación (zoom) del Strip Chart a 200 kHz, e) Señal f) Ampliación (zoom) del Strip Chart a 500 kHz.

Probeta Templada

La probeta templada registró valores significativamente menores de impedancia, expresados en forma de voltaje, a lo largo de su superficie (ver ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.). A partir de las mediciones realizadas, se evidenciaron variaciones a lo largo de la probeta que se manifestaron en incrementos negativos significativos del voltaje. En particular, los valores registrados se encontraron comprendidos entre **-0.8 V y -1.5 V** aproximadamente durante el recorrido de inspección, evidenciando una respuesta diferenciada de la señal en comparación con otras condiciones evaluadas.

Fuente: elaboración propia

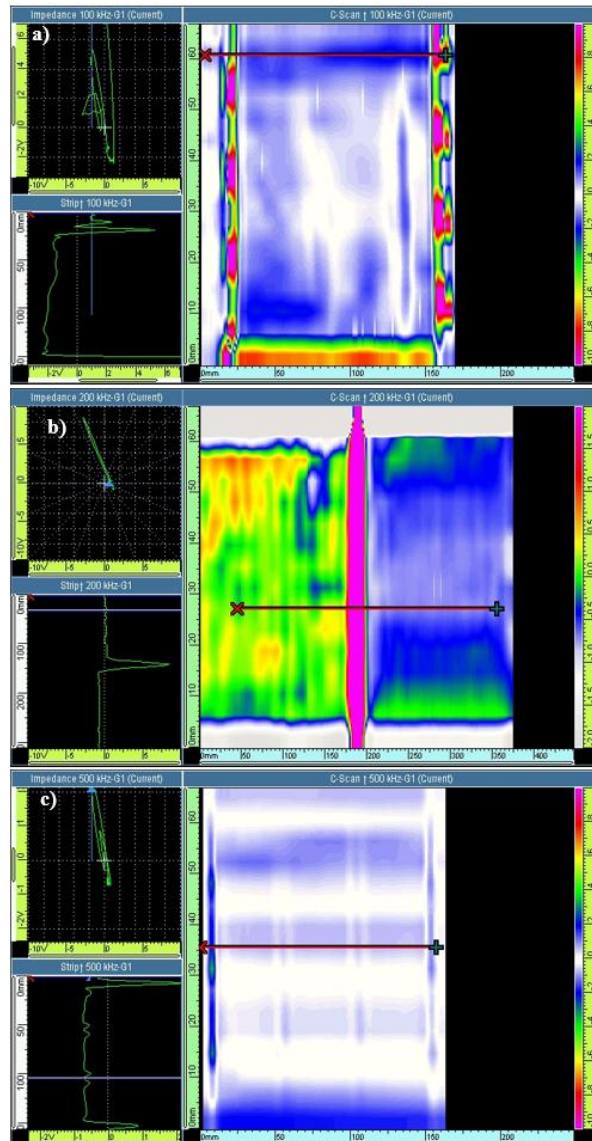


Figura 10. Resultados de la medición por ECT para la muestra templada. a) Frecuencia de 100 kHz, b) Comparación entre las muestras templada y normalizada a una frecuencia de 200 kHz, c) muestra templada a una frecuencia de 500 kHz.

Medición de corrientes de Eddy en muestra superpuestas (Normalizada y Templada)

Con el objetivo de identificar diferencias en la señal asociadas a las condiciones microestructurales de las muestras templadas y normalizadas, se realizaron mediciones comparativas mediante la superposición de ambas condiciones.

La **Figura 9** presenta la configuración experimental empleada y los resultados obtenidos durante el ensayo, realizado a frecuencias de **100 kHz** y **70 kHz**.

Fuente: elaboración propia

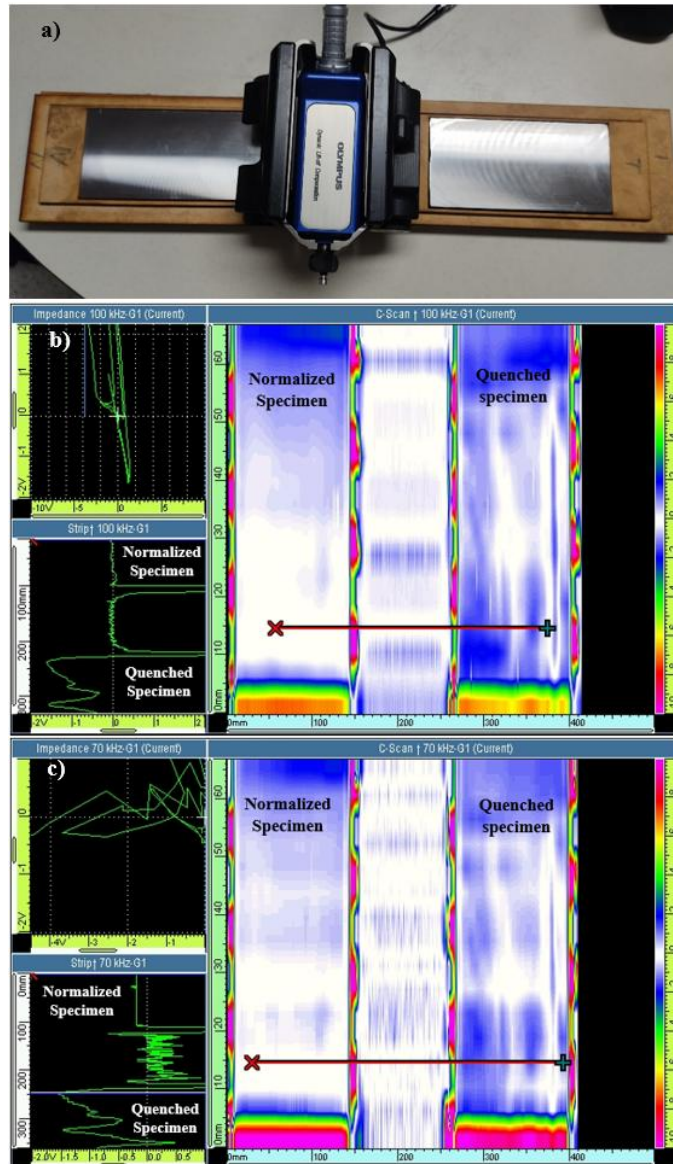


Figura 10. Configuración y resultados de la inspección por ECT. a) Montaje del ensayo) Inspección a 100 kHz, c) Inspección a 70 kHz.

El análisis de la señal obtenida mediante el equipo de corrientes inducidas (ECT), visualizada en el modo *Strip Chart View*, evidenció que la muestra **normalizada** presenta un comportamiento más uniforme a ambas frecuencias de ensayo, con una amplitud cercana al valor de referencia **cero**. En contraste, la muestra **templada** presentó una respuesta más inestable, con mayor fluctuación de la señal y amplitudes negativas cercanas a **-2 V** durante la inspección.

Discusiones

Microestructura

Las microestructuras presentadas en la Figura 4 permiten establecer una relación directa entre las condiciones de enfriamiento y la evolución de las fases en el acero R260 bajo diferentes tratamientos térmicos. En la microestructura perlítica (Figura 4-a), se puede evidenciar la presencia de perlita gruesa (zonas claras) que indica regiones donde el enfriamiento fue más lento, permitiendo mayor difusión del carbono y el crecimiento de láminas de ferrita y cementita. En contraste, la perlita fina (zonas oscuras) evidencia enfriamientos más rápidos, que limitan la difusión y generan una estructura más refinada. Este refinamiento microestructural incrementa la densidad de interfaces ferrita-cementita, lo que actúa como barrera al movimiento de dislocaciones, aumentando la dureza y mejorando la resistencia al desgaste, aspecto crítico en aplicaciones ferroviarias.

En la Figura 4-b, la formación de martensita obtenida mediante un tratamiento de temple confirma un régimen de enfriamiento severo, donde la transformación ocurre sin difusión. La morfología acicular o en placas es característica de martensita de alto carbono y sugiere una elevada sobresaturación de carbono en solución sólida. Desde el punto de vista mecánico, esta microestructura implica un aumento significativo de la dureza y la resistencia, pero también una reducción de la tenacidad, lo que puede favorecer la iniciación de grietas bajo condiciones de carga cíclica. En el contexto ferroviario, este comportamiento es particularmente relevante, ya que zonas con transformación martensítica (como capas blancas inducidas por fricción) pueden actuar como sitios críticos para la nucleación de fallas. En conjunto, el contraste entre ambas

microestructuras evidencia cómo el control del historial térmico es determinante para optimizar el equilibrio entre resistencia, desgaste y confiabilidad estructural del riel. Finalmente, estos dos tipos de tratamiento son ideales ya que permitió caracterizar la señal de corrientes de Eddy bajo dos condiciones de material con diferencias notables con relación a la dureza.

Tratamientos térmicos

El valor promedio de la muestra en condiciones de tratamiento térmico de normalizado fue coherente con los reportados para el acero de riel R260 (AISI/SAE 1070). El aumento observado en la condición normalizada puede atribuirse al refinamiento de grano producido por el enfriamiento en aire, lo que incrementa la densidad de límites de grano y, por tanto, la resistencia a la deformación.

El marcado incremento en la muestra templada se asocia a la transformación martensítica inducida durante el temple, la cual genera una estructura sobresaturada y altamente distorsionada, responsable de la elevada dureza observada. Este comportamiento fue consistente con aceros con contenidos de carbono superiores al 0.6 %.

Resultados de la calibración del equipo de corrientes inducidas

El proceso de calibración se constituyó como una etapa determinante para la calidad y confiabilidad de las mediciones mediante Corrientes Inducidas (ECT), ya que permitió ajustar de manera controlada la sensibilidad del sistema y la profundidad efectiva de penetración de la señal. En una primera fase, el uso de bloques patrón estandarizados con ranuras de dimensiones conocidas facilitó la validación del desempeño del equipo, evidenciando una respuesta consistente entre la amplitud de la señal y la severidad de los defectos. Sin embargo, el análisis mostró que la dependencia de la técnica respecto a las propiedades electromagnéticas del material hacía necesario un ajuste más representativo, lo que justificó la implementación de un patrón de calibración fabricado a partir del mismo acero R260. Esta decisión permitió reducir incertidumbres y mejorar la

correlación entre las señales registradas y las condiciones reales del material. Adicionalmente, la evaluación de las señales en el dominio del tiempo y en el plano de impedancia evidenció que la amplitud se relacionó directamente con el tamaño de la discontinuidad, mientras que el ángulo de fase aportó información relevante sobre su profundidad relativa. En conjunto, estos resultados confirmaron que un proceso de calibración adecuado no solo asegura la repetibilidad de las mediciones, sino que también permite una interpretación más precisa y cuantitativa de los defectos, fortaleciendo el uso del ECT como herramienta de diagnóstico en rieles ferroviarios.

Detección de grietas simuladas en muestras de riel mediante ensayo no destructivo (END)

El análisis de los resultados obtenidos en la detección de grietas simuladas mediante ECT evidenció una alta sensibilidad del método frente a discontinuidades superficiales y subsuperficiales controladas. Se observó que, a medida que la sonda atravesaba las ranuras mecanizadas, se generaban picos de señal claramente definidos, lo que confirma la capacidad del sistema para identificar variaciones geométricas en el material. Asimismo, los resultados mostraron una relación casi lineal entre la profundidad de las grietas simuladas y la amplitud de la señal (voltaje), lo que permite no solo detectar la presencia del defecto, sino también estimar su severidad de manera cuantitativa. Sin embargo, este comportamiento presentó un límite para profundidades mayores, donde la señal tiende a atenuarse debido a la reducción en la penetración efectiva de las corrientes inducidas. Por otra parte, la variación en la frecuencia de excitación evidenció un comportamiento consistente con la teoría: frecuencias más altas mejoraron la resolución y detección de defectos superficiales, mientras que frecuencias más bajas favorecieron la penetración y la detección de defectos más profundos. Adicionalmente, la representación en el plano de impedancia y en mapas tipo C-scan permitió una visualización clara de la localización y magnitud de las discontinuidades. En conjunto, estos resultados confirman que la técnica ECT no solo es efectiva para la detección de grietas simuladas, sino que, bajo una adecuada calibración, puede proporcionar

información cuantitativa relevante sobre la profundidad y severidad de los defectos en rieles ferroviarios.

Medición de corrientes de Eddy (ECT) en muestras en normalizada y templada

El análisis de las señales de corrientes de Eddy obtenidas para las muestras normalizadas y templadas evidenció diferencias significativas asociadas directamente a las transformaciones microestructurales inducidas por los tratamientos térmicos. En las muestras normalizadas, se observó un comportamiento estable, con señales de baja amplitud y mínima dispersión, lo cual indica una respuesta homogénea del material, atribuida a su microestructura perlítica y a una mayor conductividad eléctrica. En contraste, las muestras templadas presentaron un incremento notable en la impedancia y una mayor variabilidad en la señal, caracterizada por amplitudes más elevadas y desplazamientos en el plano de impedancia, lo cual ha sido reportado en estudios previos sobre la influencia de la microestructura en la respuesta electromagnética del material [23], [24], [25]. Este comportamiento se asoció a la formación de martensita, cuya alta densidad de defectos cristalinos, menor permeabilidad magnética y mayor dureza generan una mayor oposición al flujo de corrientes inducidas.

De acuerdo con Akujärvi et al.[26], el acero mecánicamente duro —como el obtenido en las muestras templadas— también se considera magnéticamente duro, caracterizándose por un mayor parámetro de coercitividad (H_c), lo que implica que se requiere una mayor intensidad de campo magnético para modificar su estado de magnetización. Este fenómeno explica el aumento en la reactancia inductiva y, por ende, en la impedancia observada experimentalmente. Adicionalmente, se evidenció que la frecuencia de excitación influye en la respuesta de la señal: a menores frecuencias se obtuvieron mayores amplitudes debido a una mayor penetración, mientras que a frecuencias más altas la señal se concentró en la superficie, comportamiento consistente con la teoría de profundidad de penetración en ECT. Asimismo, se observó que la mayor complejidad microestructural de la martensita, caracterizada por la presencia de lamelas finas, alta

densidad de dislocaciones y campos de esfuerzo internos, introduce múltiples barreras al flujo de corrientes inducidas, lo que incrementa la dispersión de la señal y reduce su estabilidad durante el escaneo. En consecuencia, los resultados obtenidos bajo diferentes condiciones de inspección confirman el potencial de la técnica ECT como herramienta no destructiva para la identificación de variaciones microestructurales en aceros ferroviarios.

Conclusiones

Los hallazgos de este estudio permiten comprender de manera integral cómo las transformaciones microestructurales inducidas por tratamientos térmicos influyen en la respuesta electromagnética del acero de riel, evidenciando que la técnica de corrientes inducidas no solo responde a discontinuidades geométricas, sino también a cambios en el estado metalúrgico del material. Este aspecto representa una contribución relevante al campo de la ingeniería de materiales y del mantenimiento ferroviario, ya que amplía el alcance tradicional del ensayo ECT hacia la evaluación indirecta de propiedades microestructurales. En este sentido, el trabajo aporta evidencia experimental que fortalece la comprensión de la interacción entre microestructura, propiedades magnéticas y respuesta de señal, lo cual resulta fundamental para el desarrollo de metodologías más avanzadas de inspección no destructiva.

Desde una perspectiva aplicada, el estudio demuestra el potencial de la técnica ECT como herramienta estratégica en la transición hacia esquemas de mantenimiento predictivo en sistemas ferroviarios, permitiendo no solo identificar defectos, sino también anticipar condiciones críticas asociadas a procesos de degradación del material. Este enfoque abre nuevas posibilidades para la integración de técnicas de inspección con modelos de análisis estructural y monitoreo en tiempo real. Asimismo, se plantea como línea futura el desarrollo de modelos cuantitativos que relacionen parámetros de señal con variables microestructurales específicas, así como la validación de estos resultados en condiciones reales de operación. En conjunto, esta investigación contribuye al avance del conocimiento en ensayos no destructivos aplicados a infraestructura ferroviaria, promoviendo soluciones más eficientes, seguras y sostenibles en la gestión de la integridad de rieles.

Referencias

- [1] H.-M. Thomas, T. Heckel, and G. Hanspach, "Advantage of a combined ultrasonic and eddy current examination for railway inspection trains," *Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, vol. 49, no. 6, pp. 341–344, Jun. 2007, doi: 10.1784/insi.2007.49.6.341.
- [2] J. Hansen and B. Ronald, "Using Eddy Current Testing to Solve Industrial Problems," *Mater. Eval.*, vol. 64, pp. 543–546, 2006.
- [3] B. Helifa, A. Oulhadj, A. Benbelghit, I. K. Lefkaier, F. Boubenider, and D. Boutassouna, "Detection and measurement of surface cracks in ferromagnetic materials using eddy current testing," *NDT & E International*, vol. 39, no. 5, pp. 384–390, Jul. 2006, doi: 10.1016/j.ndteint.2005.11.004.
- [4] D.J. Thompson, *Railway Noise and Vibration. Mechanisms, Modelling and Means of Control*. Elsevier, 2009.
- [5] F. Braghim, S. Bruni, and R. Lewis, "Railway wheel wear," in *Wheel–Rail Interface Handbook*, R. Lewis and U. Olofsson, Eds., Cambridge, UK: Woodhead Publishing, 2009, ch. 6, pp. 172–209.
- [6] J. Seo, H.-K. Jun, S. Kwon, and D.-H. Lee, "Rolling contact fatigue and wear of two different rail steels under rollingsliding contact," *Int. J. Fatigue*, vol. 83, pp. 184–194, 2016.
- [7] E. Uhlmann, P. Lypovka, L. Hochschild, and N. Schröer, "Influence of rail grinding process parameters on rail surface roughness and surface layer hardness," *Wear*, vol. 366–367, pp. 287–293, 2016, doi: 10.1016/j.wear.2016.03.023.
- [8] J. Selvi Binoj, V. Yogesh Shah, B. Chhatwani, and R. Chhikara, "Influence of grinding on rail surface and profile - A review," *Mater. Today Proc.*, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2022.12.216.
- [9] D. T. Æ. Eadie and M. Santoro, "Top-of-rail friction control for curve noise mitigation and corrugation rate reduction," *J. Sound Vib.*, vol. 293, pp. 747–757, 2006, doi: 10.1016/j.jsv.2005.12.007.
- [10] M. Tomeoka, N. Kabe, M. Tanimoto, E. Miyauchi, and M. Nakata, "Friction control between wheel and rail by means of on-board lubrication," *Wear*, vol. 253, no. 1–2, pp. 124–129, 2002, doi: 10.1016/S0043-1648(02)00091-1.

- [11] R. Heyder and G. Girsch, "Testing of HSH® rails in high-speed tracks to minimise rail damage," *Wear*, vol. 258, no. 7–8, pp. 1014–1021, 2005, doi: 10.1016/j.wear.2004.03.050.
- [12] J. I. Egana, J. Vinolas, and M. Seco, "Investigation of the influence of rail pad stiffness on rail corrugation on a transit system," *Wear*, vol. 261, no. 2, pp. 216–224, 2006, doi: 10.1016/j.wear.2005.10.004.
- [13] M. Hiensch, J. C. O. Nielsen, and E. Verheijen, "Rail corrugation in the Netherlands - Measurements and simulations," *Wear*, vol. 253, no. 1–2, pp. 140–149, 2002, doi: 10.1016/S0043-1648(02)00093-5.
- [14] D. F. Cannon and H. Pradier, "Rail rolling contact fatigue Research by the European Rail Research Institute," *Wear*, vol. 191, no. 1–2, pp. 1–13, Jan. 1996, doi: 10.1016/0043-1648(95)06650-0.
- [15] S. Kumar, "Study of Rail Breaks : Associated Risks and Maintenance Strategies Study of Rail Breaks : Associated Risks and Maintenance Strategies," p. 33, 2006.
- [16] A. Kapoor, I. Salehi, and A. M. S. Asih, "Rolling Contact Fatigue (RCF)," in *Encyclopedia of Tribology*, Q. J. Wang and Y.-W. Chung, Eds., Boston, MA: Springer US, 2013, pp. 2904–2910. doi: 10.1007/978-0-387-92897-5_287.
- [17] E. E. Magel, "Rolling Contact Fatigue: A Comprehensive Review," *Federal Railroad Administration*, no. November, p. 132, 2011.
- [18] "Rolling Contact Fatigue Life of Rail for Different Slip Conditions," pp. 2243–2264, 2017.
- [19] D. F. Cannon and H. Pradier, "Rail rolling contact fatigue Research by the European Rail Research Institute," *Wear*, vol. 191, no. 1–2, pp. 1–13, Jan. 1996, doi: 10.1016/0043-1648(95)06650-0.
- [20] E. E. Magel, "Rolling Contact Fatigue: A Comprehensive Review," *Federal Railroad Administration*, no. November, p. 132, 2011.
- [21] T. Heckel, H. M. Thomas, M. Kreutzbruck, and S. Rühle, "High speed non-destructive rail testing with advanced ultrasound and eddy-current testing techniques," *NDT in Progress 2009 - 5th International Workshop of NDT Experts, Proceedings*, pp. 101–109, 2009.
- [22] A. Dey, J. Kurz, and L. Tenczynski, "Detection and evaluation of rail defects with non-destructive testing methods," *19th World Conference on Non Destructive Testing*, pp. 1–9, 2016.

- [23] S. Kahrobaee and M. Kashefi, "Hardness profile plotting using multi-frequency multi-output electromagnetic sensor," *NDT and E International*, vol. 44, no. 4, pp. 335–338, 2011, doi: 10.1016/j.ndteint.2011.01.005.
- [24] M. Masoumi, D. M. A. Centeno, and E. A. A. Echeverri, "Tailoring the Microstructure using Quenching and Partitioning Processing in a Commercial Mn-Si-Cr Spring Steel to Improve Tensile Properties," *Arab. J. Sci. Eng.*, vol. 49, no. 11, pp. 15121–15141, Nov. 2024, doi: 10.1007/s13369-024-08888-9.
- [25] I. M. O. A. Costa, C. Mesplont, J. Bouquerel, and J. B. Vogt, "Relations between microstructure and hardness of plain carbon steels using eddy current technique," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 859, no. 1, 2020, doi: 10.1088/1757-899X/859/1/012005.
- [26] V. Akujärvi, T. Cedell, O. Gutnichenko, M. Jaskari, and M. Andersson, "Evolution of magnetic properties during tempering," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 119, no. 3–4, pp. 2329–2339, Mar. 2022, doi: 10.1007/s00170-021-08464-7.