

Caracterización de capa blanca y marrón promovidas por un proceso de esmerilado a baja escala en laboratorio

Characterization of white and brown etching layers promoted by a small-scale grinding process in laboratory

J.C. Sánchez¹   J.A. Jaramillo¹  H. Estupiñán¹  G. Hernández¹ 
A. Toro¹  V. Wilches¹ 

¹Energy Research and Innovation Group – GIIEN, Institución Universitaria Pascual Bravo, Medellín Colombia

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

³Materiales y Procesos Alternativos MAPA, Universidad EIA, Envigado, Colombia

Resumen

Objetivos: El objetivo principal de este estudio fue promover la formación de capas de ataque blanco y marrón (White Etching Layer, WEL, y Brown Etching Layer, BEL) en acero perlítico R260 mediante un proceso de rectificado controlado en laboratorio, con el fin de analizar los cambios microestructurales y mecánicos desde la superficie hasta el material base.

Materiales y métodos: Se utilizó acero perlítico R260 empleado en la fabricación de rieles ferroviarios. Las capas transformadas se generaron mediante un proceso de rectificado controlado. La caracterización microestructural se realizó mediante microscopía óptica (LOM) y microscopía electrónica de barrido (SEM). La caracterización mecánica se llevó a cabo mediante ensayos de microdureza y nanoindentación desde la superficie rectificada hacia el volumen del material. Posteriormente, la zona WEL fue analizada mediante microscopía electrónica de transmisión (TEM) para identificar los cambios microestructurales en las diferentes zonas afectadas por el rectificado.

Resultados: Los resultados mostraron que es posible distinguir la WEL de la BEL no solo por sus características morfológicas observadas mediante LOM y SEM, sino también por sus propiedades mecánicas. Ambas capas presentaron valores de dureza y módulo de Young significativamente superiores a los del material base perlítico.

Conclusiones: Las transformaciones microestructurales inducidas por el rectificado se identificaron visualmente como WEL y BEL a través de variaciones en el contraste y la textura observadas mediante LOM y SEM. Estas capas se extendieron desde la superficie rectificada hasta profundidades cercanas a 30 µm y presentaron respuestas mecánicas diferenciadas, asociadas a cambios microestructurales intrínsecos generados por el proceso de rectificado.

Palabras clave: WEL, BEL, Molienda, Perlita, Propiedades mecánicas.

Abstract

Objectives: The main objective of this study was to promote the formation of White and Brown Etching Layers (WEL and BEL) on R260 pearlitic steel by means of a controlled laboratory grinding process, in order to analyze the microstructural and mechanical changes from the surface to the base material.

Materials and methods: R260 pearlitic steel used for railway rail manufacturing was investigated. The transformed surface layers were generated through a controlled grinding process. Microstructural characterization was performed using light optical microscopy (LOM) and scanning electron microscopy (SEM). Mechanical characterization was carried out by microhardness testing and nanoindentation from the ground surface toward the bulk material. Subsequently, the WEL region was analyzed by transmission electron microscopy (TEM) to identify microstructural changes in the different zones affected by the grinding process.

Results: The results showed that WEL and BEL can be distinguished not only by their morphological features observed by LOM and SEM, but also by their mechanical properties. Both layers exhibited significantly higher hardness and Young's modulus values than the pearlitic base material.

Conclusions: The microstructural transformations induced by the grinding process were visually identified as WEL and BEL through contrast and texture variations observed by LOM and SEM. These layers extended from the ground surface to depths of approximately 30 µm and exhibited distinct mechanical responses associated with intrinsic microstructural changes generated by the grinding process.

Keywords: WEL, BEL, Grinding, Pearlite, Mechanical properties.

¿Cómo citar?

Sánchez JC, Jaramillo JA, Estupiñán H, Hernández G. Caracterización de capa blanca y marrón promovidas por un proceso de esmerilado a baja escala en laboratorio. Ingeniería y Competitividad, 2025, 27(3)e-21014972

<https://doi.org/10.25100/iyv.v27i3.14972>

Recibido: 07/07/25

Revisado: 06/10/25

Aceptado: 1/12/25

Online: 19/01/26

Correspondencia

juan.sanchezg@pascualbravo.edu.co



¿Por qué se realizó este estudio?

Este tema es de vital importancia para el sector ferroviario, ya que representa un mecanismo de daño primario en las cabezas de los rieles, lo que conlleva intervalos de mantenimiento significativamente más cortos. Además, elucidar las propiedades y los posibles mecanismos de formación puede facilitar los ajustes en las condiciones de operación para prevenir la formación prematura de esta capa, contribuyendo así al desarrollo de estrategias de mitigación eficaces.

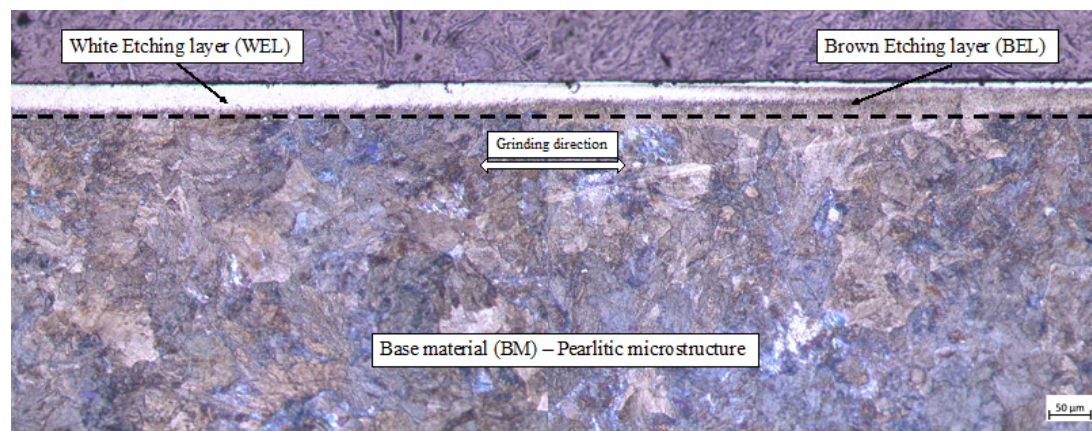
¿Cuáles fueron los hallazgos más relevantes?

El estudio logró la formación distintiva de una microestructura en condiciones controladas de laboratorio, que presenta un marcado contraste visual con el material base. La fase resultante presentó valores de propiedades mecánicas y elásticas hasta cuatro veces superiores a los de la microestructura inicial. Además, se evidenció una zona de transición entre el material a granel y la superficie de contacto donde se desarrolló la capa de grabado blanco (WEL), que presenta propiedades mecánicas y elásticas intermedias en relación con las otras dos microestructuras.

¿Qué aportan estos hallazgos?

Este trabajo proporciona un método reproducible para promover la formación de la capa de grabado blanco (WEL) en las cabezas de los rieles en condiciones controladas de laboratorio. Esto constituye un paso fundamental para predecir o validar los mecanismos de formación de esta microestructura en sistemas ferroviarios en condiciones de operación.

Graphical Abstract



Introducción

Las altas y repetitivas condiciones de carga externa registradas en los pares de sistemas ferroviarios rueda/rail generan alteraciones acumulativas en la superficie en las áreas de contacto y regiones cercanas. El contacto continuo con la rueda fomenta varios fenómenos que en algunos casos no contribuyen a un buen rendimiento del raíl en condiciones de operación comercial. Algunos de estos problemas ya se han demostrado en investigaciones anteriores como sentadillas (1–3), montantes (4,5), grietas por RCF (6–8), corrugación (9–11) o WEL (12–14), que están asociadas a muchos aspectos y variables como la carga (15), la fluencia (16–18), la composición química y la microestructura (19,20) etc., promoviendo en algunos casos daños catastróficos en el ferrocarril. Uno de estos problemas asociados al contacto que ha sido objeto de varias investigaciones en los últimos años es el WEL, tanto su rendimiento como sus mecanismos de formación (21–23). Se han realizado varias investigaciones relacionadas con este tema, no solo para sistemas ferroviarios sino también para otros componentes y campos como rodamientos laminantes (24,25), procesos de mecanizado (26,27), etc. Sin embargo, en sistemas ferroviarios, la formación de esta capa está relacionada con daños en otros raíles como sentadillas o mecanismo RCF (28,29) al promover microfisuraciones dentro del raíl (30–33) que podrían causar una fractura completa del componente y altos costos de mantenimiento (5,34,35). Las fases presentes en esta zona tienen diferentes hipótesis sobre la microestructura: martensita (36), nanocristales de Fe-C (37), perlita deformada, nanocristales de martensita, austenita y cementita (38). La formación del WEL ha sido evidenciada en actividades comerciales, contacto con ruedas de raíl y actividades de rectificado de mantenimientos y, según esto, varios investigadores han propuesto dos hipótesis sobre la formación del WEL: (1) la primera se ha relacionado con los cambios microestructurales asociados a las altas temperaturas alcanzadas en el contacto entre rueda de raíles y piedra de rectificado de raíles (36,39,40) y (2) la segunda se ha asociado con la alta deformación plástica, que se ve promovida por las altas fuerzas tangenciales sobre la zona de contacto (37,41–43). Según la primera hipótesis, las temperaturas alcanzadas en el proceso superan la temperatura de autenización y el enfriamiento rápido promueve la transformación martensítica que se corrobora con mediciones de dureza realizadas en la capa y, en algunos casos, es confirmada por zonas de austenita retenidas que respaldan esta suposición. En relación con la segunda hipótesis, el fenómeno se asocia con la disolución de la microestructura perlítica. Dentro de los granos perlíticos, la cementita se disuelve por los movimientos de altas tensiones y dislocaciones, y los átomos de carbono enriquecen las cantidades de carbono de la ferrita al aumentar sus propiedades mecánicas. Esto podría estar respaldado por las imágenes de TEM que muestran patrones de difracción de nanogranos (22,44). Confirmar esta hipótesis permite crear estrategias no solo para mejorar el comportamiento tribológico reduciendo la fuerza tangencial, sino también para reducir la temperatura en la interfaz.

Además, se ha demostrado que entre el sustrato WEL y el perlita es posible formar una nueva microestructura con propiedades mecánicas intermedias que se identifica por su color marrón cuando se graba con Nital 3% y se observa mediante microscopía óptica (45), y a partir de esto, la capa se denomina BEL (Capa de Grabado Marrón). Su formación está relacionada por dos explicaciones: (1) la primera está asociada a una transición de microestructura en el proceso de formación de la WEL y, por ello, sus propiedades mecánicas se encuentran entre la WEL y la perlita;

(2) la otra se explica como una martensita templada tras la formación de la WEL causada por los ciclos térmicos en la interfaz de contacto.

En este trabajo se evalúa la posibilidad de promover la formación de WEL en laboratorio sobre un tramo comercial de raíl mediante un proceso de rectificado a pequeña escala para medir los cambios en la microestructura óptica y sus propiedades mecánicas en comparación con el material base del componente, que es una microestructura perlítica. Se extrajeron muestras de la superficie de rectificado para la inspección óptica mediante LOM y SEM, y para la caracterización mecánica se realizaron microdureza y nanoindentación. Los valores obtenidos se correlacionaron con las microestructuras observadas y están asociados con la hipótesis propuesta en la literatura. Además, este estudio valida la formación de una Capa de Grabado Blanco (WEL) en superficies de rodamiento de raíles bajo condiciones de rectificado. Este hallazgo es un paso crucial para implementar técnicas avanzadas que caracterizen los cambios en la cabeza del riel, específicamente la microestructura alterada y las propiedades del material resultantes del contacto entre ruedas y rieles. Por lo tanto, la capacidad de inducir la formación de WEL en el laboratorio será muy beneficiosa como paso preliminar para el desarrollo y calibración de métodos de Ensayo No Destructivo (NDT) para apoyar nuevas estrategias de mantenimiento en este campo, ya que la etapa de identificación de daños promueve por cambios microestructurales en la superficie de contacto

Materiales y métodos

Material

El material utilizado fue un acero perlético para fabricar raíles con la designación R260. La composición química se muestra en la Tabla 1 y la microestructura en la Fig. 1.

Tabla 1. Composición química (en peso) del material del raíl utilizado para las pruebas.

Elemento	C	Si	Mn	S	P	Ni	Cr	Mo	Al	Cu	Pb	Sn	Ti	V	SB	Ca
en parte.	0.736	0.27	1.056	0.023	0.032	0.021	0.026	0.006	0	0.002	0	0	0.016	0.003	0	0

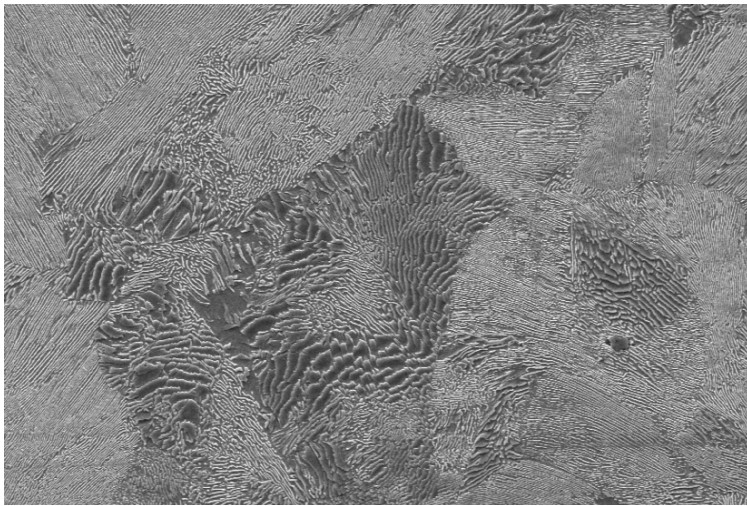


Figura 1. Microestructura del material ferroviario R260. SEM. (2000x). Acero perlético.

La microestructura mostrada en la figura anterior muestra una micrografía completamente perlítica según la composición química mostrada en la Tabla 1, que clasifica el material como acero eutectoide.

Proceso de formación de la WEL

La formación de una capa blanca de grabado en la superficie del material del raíl se favoreció mediante un proceso de rectificado. Se adaptó una máquina industrial para simular condiciones a pequeña escala de un proceso de molienda en un ferrocarril comercial. La Fig. 2 muestra la disposición utilizada para las pruebas.

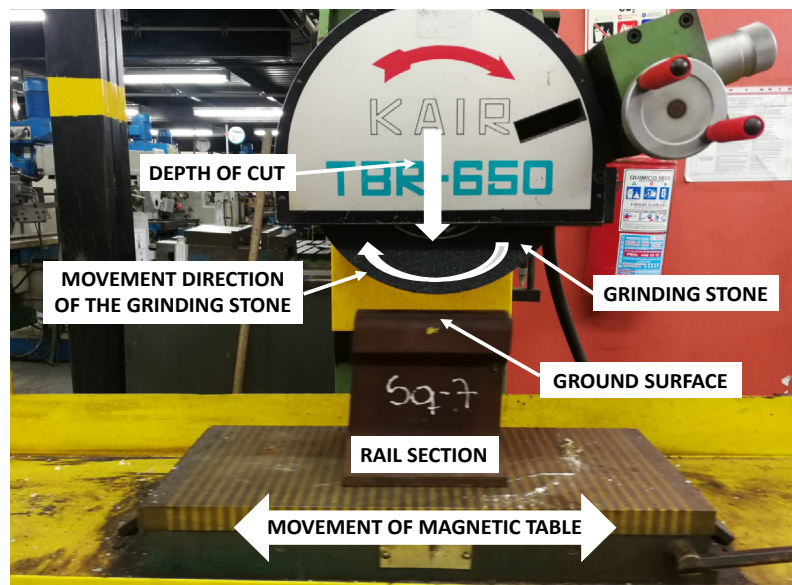


Figura 2. Máquina utilizada para promover la formación WEL en la superficie del material ferroviario

Las condiciones del proceso consideradas fueron las siguientes: velocidad de la piedra de moler de 2120 rpm, 30 μm de profundidad de corte, 1 m/s de velocidad lineal de la mesa magnética y solo una pasada de la piedra sobre la cabeza del raíl. El valor de carga se establecía en condiciones estáticas colocando una celda de carga bajo la muestra. La variación de la carga en función de la profundidad de corte se determinó experimentalmente, como se muestra en la Fig. 3, donde se puede observar que para una profundidad de corte de 30 μm la carga estática es de alrededor de 160 gf.

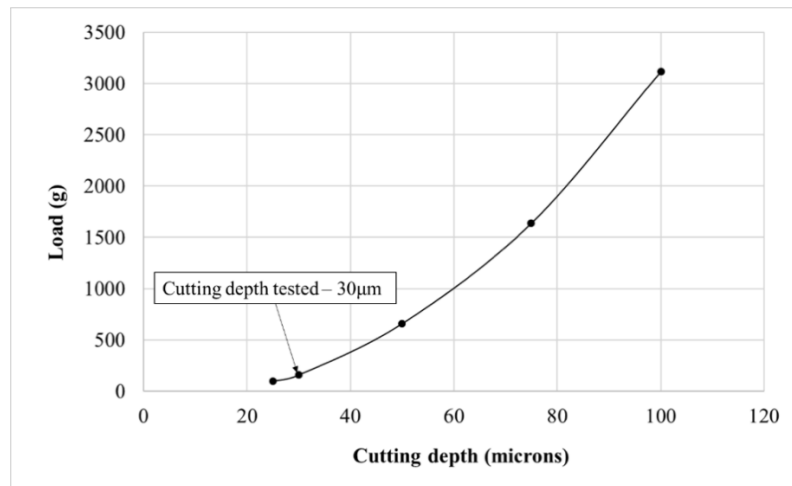


Figura 3. Estimación experimental de la carga máxima en función de la profundidad de corte

Caracterización óptica

El análisis del WEL se realizó utilizando un ZEISS Axioscope 5 LOM y un ZEISS EVO 10 SEM con un voltaje de 20kV y una distancia de trabajo menor a 9 mm. Se extrajeron secciones longitudinales (L) del cabezal del carril como se muestra en la Fig. 4. Además, se realizó una caracterización mediante TEM para confirmar la microestructura generada en la superficie de contacto por el proceso de molienda. Para el análisis TEM, se prepararon láminas delgadas mediante haz de iones enfocados (FIB) en el Centro Brasileño de Investigación en Energía y Materiales (CNPEM). Las muestras fueron examinadas utilizando un microscopio electrónico analítico multipropósito JEOL JEM-2100F equipado con un cañón de emisión de campo (FEG) que opera a 200 kV. Se realizaron análisis de varias muestras utilizando patrones de difracción de electrones obtenidos mediante el modo de difracción de electrones de área seleccionada (SAED) en varios lugares dentro del área de inspección, utilizando la misma longitud de cámara. La preparación metalográfica de las muestras se realizó siguiendo el procedimiento ASTM E3 y el grabado con Nital 3%.

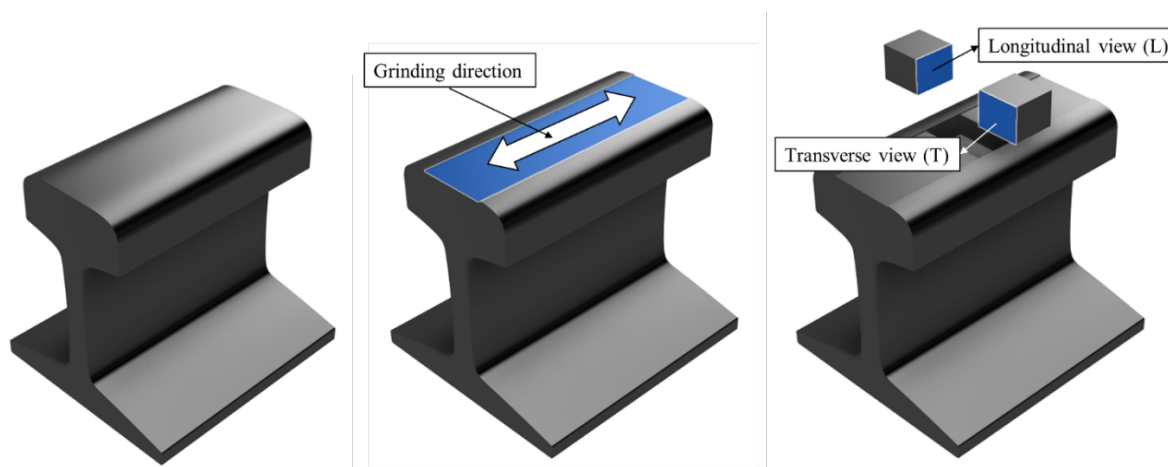


Figura 4. Zona de extracción de las muestras analizadas.

Caracterización mecánica

Se realizaron pruebas de microdureza en SHIMANU HMV-G31 y pruebas de nano hendidura en los laboratorios Ibis Authority - Fischer Cripps para estudiar la variación de las propiedades mecánicas respecto a la distancia a la superficie.

Resultados y discusión

Análisis microestructural óptico

La Fig. 5 muestra la microestructura obtenida tras el proceso de molienda. Se formó una capa de grabado blanco (WEL) en la superficie debido al contacto con la piedra de moler y también se puede observar una capa de grabado marrón (BEL), que ha sido reportada por otros autores (37,46–49). Aunque los grosores de la WEL y la BEL varían sobre la superficie de contacto, parece que el grosor total del material afectado por el proceso termomecánico permanece estable (véase la línea punteada en la figura).

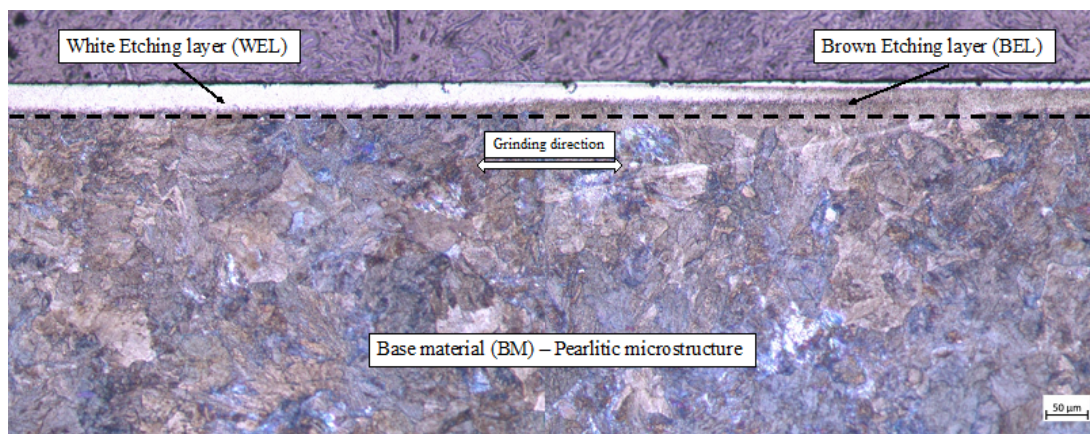


Figura 5. Vista transversal de la microestructura tras el proceso de rectificado. Vista longitudinal

La Fig. 6 muestra con más detalle la microestructura de una muestra de suelo examinada por el SEM. Aunque la WEL es homogénea y muestra poco contraste electrónico, la BEL tiene el aspecto de estar compuesta por lamelas perlíticas fracturadas, lo cual es consistente con las altas fuerzas tangenciales sobre la interfaz entre el riel y la piedra de afilar (41,48,50,51). La zona analizada se tomó cerca de la zona de contacto para asegurar la identificación de cambios microestructurales.

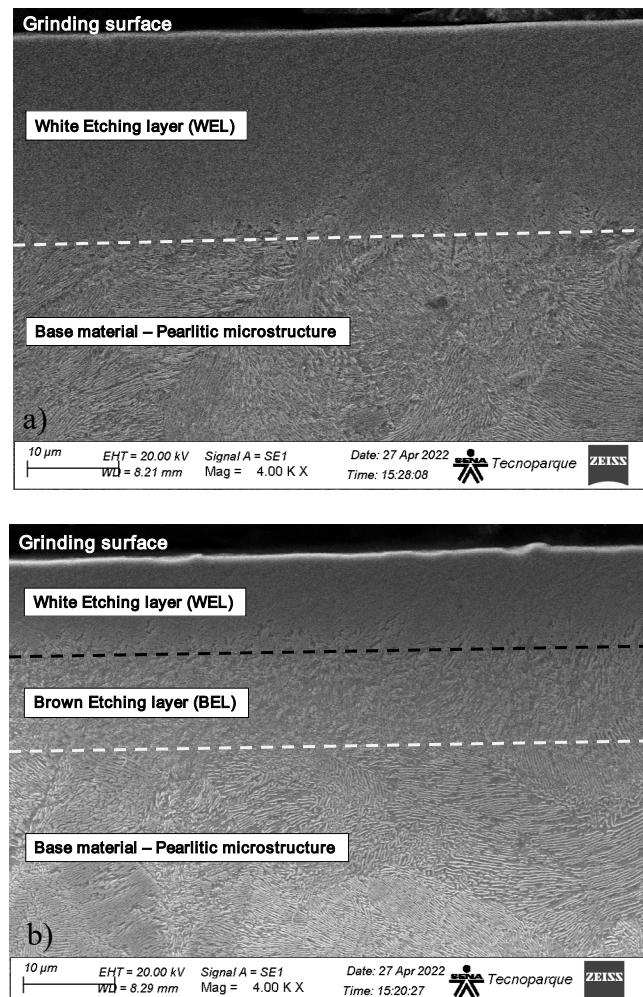


Figura 6. Variación microestructural desde la superficie del suelo hasta el sustrato (4000x). Vista longitudinal

De las Fig. 6a) y 6b) se puede corroborar que la microestructura en el subsuelo presenta una variación respecto a la profundidad, como se mostró arriba. Además, como se ha dicho antes, se puede identificar una variación de las dos primeras zonas respecto a la capa transformada (WEL y BEL). A partir de esto, en la Fig. 6a, se estableció una línea imaginaria para separar estas zonas respecto al material base perlítico y así identificar la zona térmica y plástica afectada mediante el proceso de molienda. En ambas imágenes, Fig. 6a y 6b), la línea blanca de puntos, que separa la microestructura transformada, está situada a la misma profundidad de unos 30 micras y no cambia en ambos casos; sin embargo, la línea negra de puntos, que separa la WEL de la BEL (Fig. 6b), muestra una variación de la cantidad de WEL transformada tal como se identificó en la Fig. 5, sugiriendo una posible hipótesis de una cantidad límite del material transformado para condiciones específicas de prueba del proceso de molienda.

Microdureza y nano-indentación

La Fig. 7 muestra los resultados de las mediciones de microdureza en función de la distancia desde la superficie de contacto.

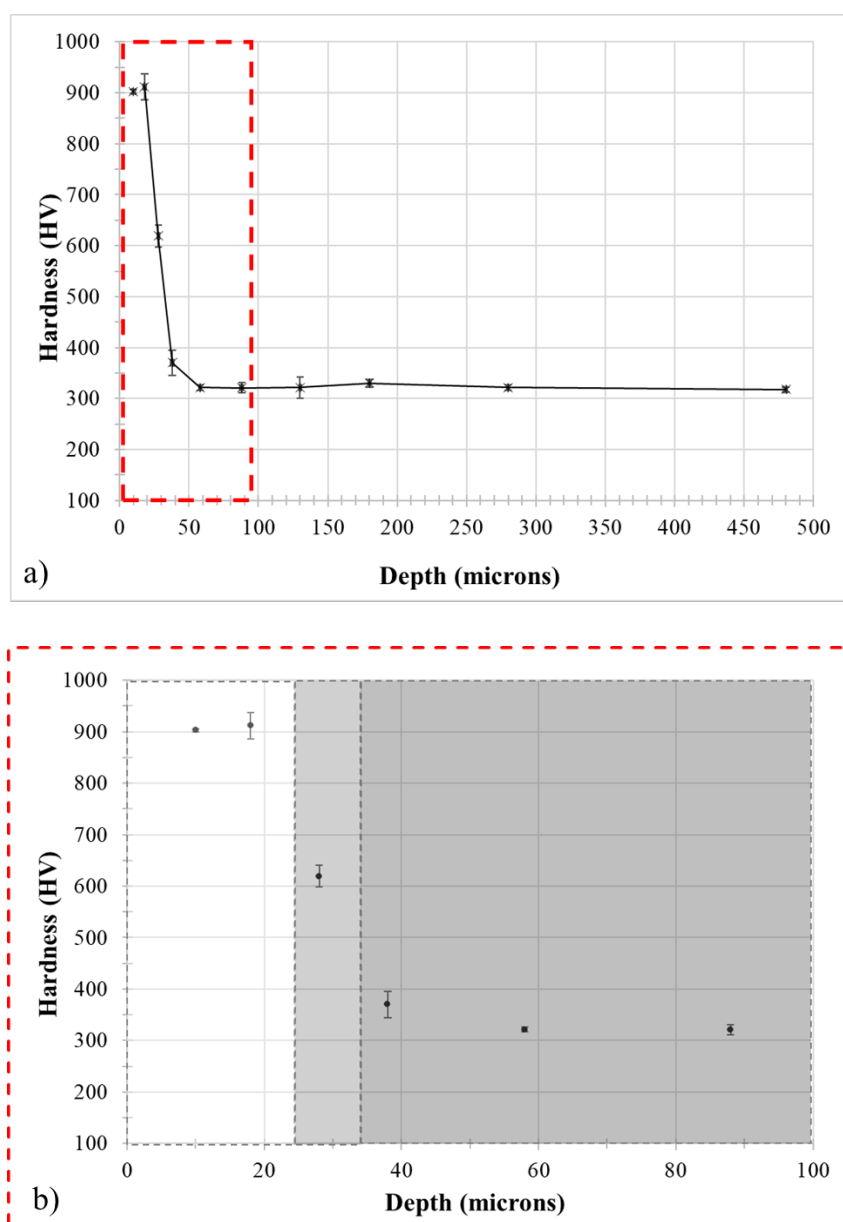


Figura 7.1a microdureza resulta de una sección transversal tras el proceso de molienda. a) Perfil de microdureza en función de la distancia a la superficie, b) Detalle de los primeros 100 micras desde la superficie.

Los resultados obtenidos muestran un aumento notable de la dureza cerca de la superficie de contacto en comparación con los valores mostrados en la microestructura perlítica al disminuir cuando la profundidad asciende desde la superficie del suelo. Fig. 7b) permite identificar las tres zonas (WEL, BEL y material base) según sus valores de microdureza, es decir, 910HV para WEL, 640HV para BEL y 310HV para perlita. Estos valores coinciden con los datos reportados por otros autores para estructuras similares (25,38,42,43,52).

La Fig. 8 muestra los valores de dureza (H) y el módulo de Young (E) para cada zona medidos mediante pruebas de nanoindentación. Como era de esperar, tanto H como E disminuyen con la distancia a la superficie respecto a la variación microestructural. Los datos para las tres zonas son similares a los resultados reportados por otros autores (43,50,53) que reportaron valores alrededor

de 11 - 13 GPa para WEL, 5 - 6,5 GPa para BEL y 3,5-4,5 GPa para la estructura perlítica (material base).

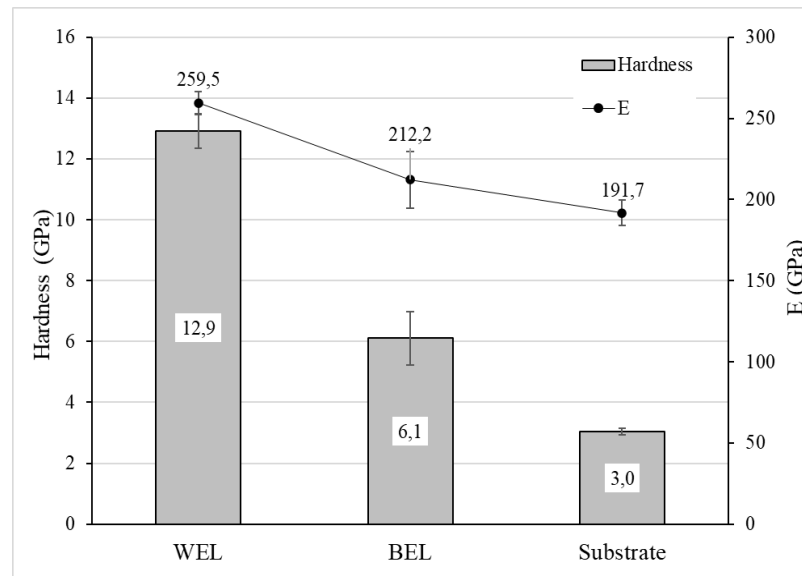


Figura 8. Dureza y módulo de Young para WEL, BEL y material base. Mediciones de nanoindentación.

La Fig. 9 presenta una descripción visual de la variación de la microdureza medida paralela a la superficie de contacto a lo largo de las capas de grabado blanca y marrón. Las hendiduras se hicieron en una parte de la sección mostrada en la Fig. 5, donde se puede identificar visualmente la variación entre WEL y BEL.

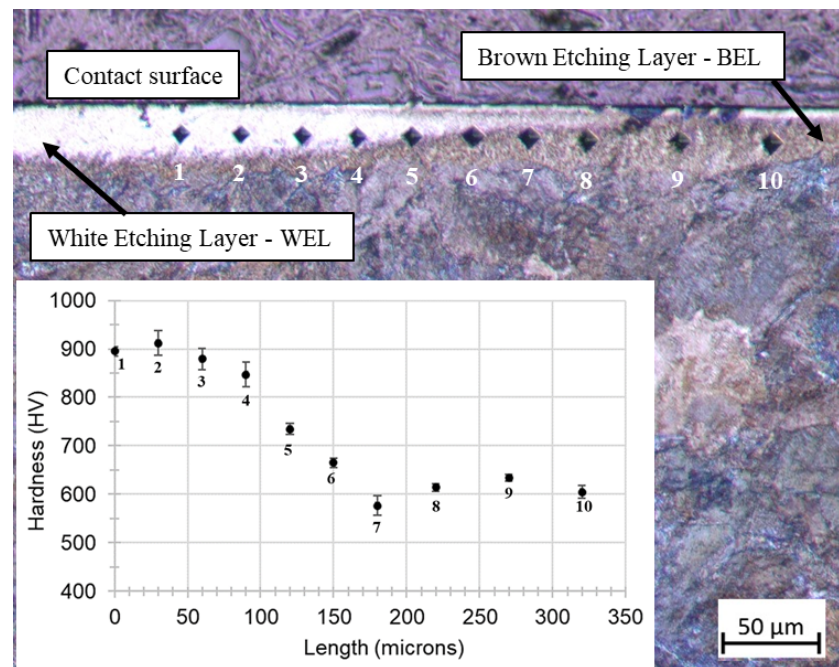


Figura 9. Perfil de microdureza en la zona afectada por el proceso de molienda. Vista longitudinal

Los resultados confirmaron que tanto la WEL como la BEL, tienen diferentes propiedades mecánicas asociadas a los valores previamente reportados y es posible que la transformación WEL alcance un grosor máximo de capa asociado a las condiciones de rectificado de la microestructura previa de la BEL (54–56).

Además, se realizó un análisis microestructural utilizando TEM para identificar la microestructura de la WEL y corroborar la hipótesis preliminar, que sugería una microestructura martensítica basada en los valores de dureza observados. La Fig. 10 presenta una imagen BF (Campo Brillante) dentro de la región WEL, con el círculo punteado indicando la región analizada.

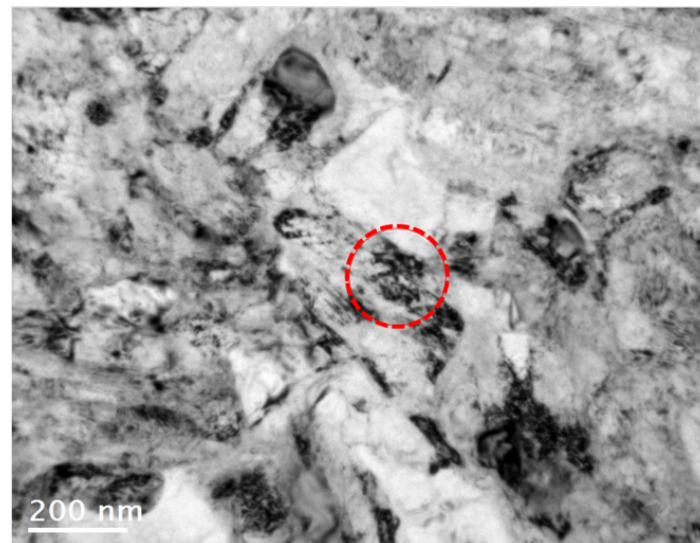


Figura 10. Imagen BF (Campo Brillante) dentro de la región WEL

Los patrones de difracción obtenidos se muestran en la Fig. 11 y, a partir de esto, se midieron la distancia interplanar en SAED y se compararon con valores teóricos como se muestra en la Tabla 2

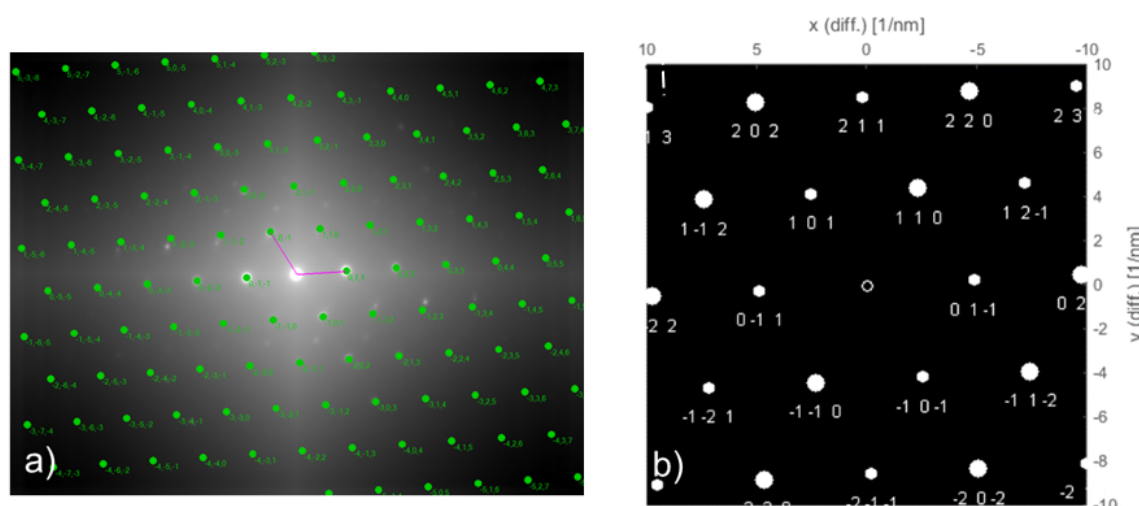


Figura 11. Patrones de difracción de la sección WEL. a) Indexación de Patrones para SAED y b) Zona de ejes de Patrón SAED Simulado [-111]

Tabla 2. Espaciamiento d teórico y experimental

Avión	Espaciamiento teórico en D[Å]	d-Espaciado[Å] (patrón SAED)
101	2.07050	2.0640
112	1.20740	1.1940
202	1.03540	1.0340
213	0.78930	0.7820

A partir de los datos reportados en la Tabla 2, la hipótesis preliminar fue corroborada. Los valores interplanares de espaciamiento d que se encuentran en esta región están asociados a una estructura tetragonal relacionada con una microestructura martensítica. Los patrones obtenidos en estos puntos de análisis pueden relacionarse con una estructura martensítica que se comparó con la tarjeta JCPDS número #00-044-1293. Estos resultados están respaldados por los valores de nanoindentación y microdureza reportados en las Figuras 8 y 9. La microdureza alcanzó hasta 900 HV, y la dureza de nanoindentación alcanzó 12,9 GPa, mientras que los valores del módulo de Young rondaron los 260 GPa. Estos datos confirman una transformación microestructural hacia una estructura martensítica

Conclusiones

Es posible promover la formación de la Capa de Grabado Blanco y la Capa de Grabado Marrón en la superficie de los raíles perlíticos mediante el molimiento en laboratorio. Las respuestas mecánicas de WEL y BEL son diferentes, lo que puede estar relacionado con cambios microestructurales intrínsecos en el material como consecuencia del proceso de molienda. Se pudo identificar mediante inspección visual las transformaciones microestructurales (WEL y BEL) obtenidas mediante el proceso de molienda que mostraron una variación en el contraste y la textura mediante técnicas LOM y SEM en comparación con el material base perlítico desde la superficie del suelo hasta 30 micras de profundidad. La respuesta mecánica de las microestructuras identificadas mostró una diferencia notable respecto al material base perlítico, alcanzando hasta tres y cuatro veces la dureza y los valores de nanoindentación del volumen, respectivamente. Según la hipótesis basada en la respuesta mecánica de la WEL, se confirmó una microestructura martensítica respecto a los patrones de difracción obtenidos por el TEM en la zona afectada comparando el espaciamiento d con valores teóricos

Los resultados de esta investigación podrían considerarse como la primera etapa de una nueva investigación para utilizar Técnicas No Destructivas para la identificación de WEL en zonas ferroviarias en ferrocarriles comerciales. Además, identificar las condiciones operativas de la prueba es posible estudiar las condiciones específicas de la generación WEL para reducir esta formación durante el proceso de molienda como actividad de mantenimiento.

Agradecimientos

Los autores reconocen al Servicio Nacional de Aprendizaje SENA por permitir el uso de su equipo y espacios, a la Universidad Nacional de Colombia por financiar la investigación postdoctoral, al Metro de Medellín por proporcionar material ferroviario y a Tecnoparque Nodo Medellín por

proporcionar equipos para la caracterización de materiales a través del proyecto I2022-0110481-11880.

Declaración de contribución de autoría de CreditT

Conceptualización - Ideas: Juan C. Sánchez, Jaime A. Jaramillo. Análisis formal: Juan C. Sánchez, Jaime A. Jaramillo. Curación de datos: Juan C. Sánchez, Jaime A. Jaramillo. Investigación: Juan C. Sánchez. Metodología: Juan C. Sánchez, Jaime A. Jaramillo, Alejandro Toro, Juan C. Sánchez. Gestión de Proyectos: Jaime A. Jaramillo, Hugo A. Estupiñán. Supervisión: Juan C. Sánchez, Jaime A. Jaramillo, Alejandro Toro. Hugo A. Estupiñán. Validación: Juan C. Sánchez. Redacción - borrador original - Elaboración: Juan C. Sánchez, Jaime A. Jaramillo. Redacción - revisión y edición -Elaboración: Juan C. Sánchez, Jaime A. Jaramillo, Alejandro Toro, Hugo A. Estupiñán, Luis G. Hernández, Luis V. Wilches.

Financiación: Servicio Nacional de Aprendizaje SENA. Conflicto de intereses: no declara. Aspecto ético: no declara.

Referencias

1. Gschwandl TJ, Daves W, Antretter T, Bucher C, Kunstner D. En el camino hacia la comprensión de las sentadillas: estado de tensión residual de los raíles. *Integridad Estructural de Procedia*. 2023;46:17-23.
<https://doi.org/10.1016/j.prostr.2023.06.004>
2. Naseri R, Gedney BL, Asgari H, Rizos DC. Detección de sentadillas sobre rail mediante procesamiento híbrido de mediciones de aceleración en cajas de eje. *Resultados en Ingeniería*. 2025;26:105343.
<https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105343>
3. Baltic S, Daves W. Modelo de mecanismo de iniciación en cuclillas en contacto entre raíl y rueda. *Eng Fract Mech*. 2022;269:108525.
<https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2022.108525>
4. Grassie SL. Studs y sentadillas: La historia en evolución. *Llevar*. 2016;366-367:194-9.
<https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.03.021>
5. Grassie SL, Fletcher DI, Hernandez EAG, Summers P. Studs: Un defecto tipo sentadilla en los raíles. *Proc Inst Mech Eng F J Rail Rapid Transit*. 2012; 226(3):243-56.
<https://doi.org/10.1177/0954409711421462>
6. Xie Y, Ding H, Shi Z, Meli E, Guo J, Liu Q, et al. Un método novedoso de predicción para el daño por fatiga por contacto por rodamiento en los materiales del raíl de perlita basado en límites de ajuste y teoría de conjuntos aproximados con modelo de nube. *Fatiga Int J*. 2025;190:108654.
<https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2024.108654>
7. Zhao X, Xing YH, Zhang X, Peng F, Xue HD, Han YL. Fatiga de contacto por rodamiento ferroviario en una línea china de transporte pesado: observaciones, monitorización y simulaciones. *Eng Fail Anal*. 2025;167:109040.
<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.109040>

8. Wang R, Tan Z, Tian Y, Zhang J, Gao Y, Shan A, et al. Estudio sobre la iniciación y propagación de grietas por fatiga por contacto por rodamiento en raíles U75V tratados con plasma laminar. *Tribol Int.* 2024;198:109879.

<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2024.109879>

9. Yang J, Huo J, Yao D. Detección de corrugación de raíles basada en la ventana de posición óptima y la descomposición en modos de ancho de banda ponderado. *Medida.* 2025;255:117888.

<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2025.117888>

10. Zhang P, Li S, Ren F, Hajizad O, Dollevoet R, Li Z. Investigación microestructural sobre el mecanismo de daño de la corrugación de raíles de paso corto. *Fallo de Inglés Anal.* 2025;174:109512.

<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2025.109512>

11. Guan Q, Wen Z, Liu B, Wang H, Liang S. Una nueva perspectiva sobre la corrugación ferroviaria y sus implicaciones prácticas. *Llevar.* 2025;564-565:205743.

<https://doi.org/10.1016/j.wear.2025.205743>

12. Bedoya-Zapata AD, León-Henao H, Mesaritis M, Molina LF, Palacio M, Santa JF, et al. Formación de la Capa de Grabado Blanco (WEL) en diferentes niveles de vía tras operaciones de molienda en el campo. *Llevar.* 2022;502-503:204371.

<https://doi.org/10.1016/j.wear.2022.204371>

13. Liu JP, Huang H, Liu A, Ma SN, Ren Y, Ding HH, entre otros. Mecanismo de formación de capas de grabado blanco en aceros perláticos bajo abrasión continua. *Llevar.* 2025;572-573:206050.

<https://doi.org/10.1016/j.wear.2025.206050>

14. Saxena AK, Kumar A, Herbig M, Brinckmann S, Dehm G, Kirchlechner C. Investigaciones de microfracturas en capas de grabado blanco. *Mater Des.* 2019;180:107892.

<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107892>

15. Ding HH, Fu ZK, Wang WJ, Guo J, Liu QY, Zhu MH. Investigación sobre el efecto de la velocidad de rotación en el desgaste por rodamiento y los comportamientos de daño de materiales de ruedas/raíles. *Llevar.* 2015;330-331:563-70.

<https://doi.org/10.1016/j.wear.2014.12.043>

16. Chang C, Chen B, Cai Y, Wang J. Investigación experimental de las características de adherencia de ruedas y raíles de alta velocidad bajo gran fluencia y condiciones de agua. *Llevar.* 2024;540-541:205254.

<https://doi.org/10.1016/j.wear.2024.205254>

17. Hu Y, Zhou L, Ding HH, Tan GX, Lewis R, Liu QY, et al. Investigación sobre desgaste y fatiga por contacto por rodamiento de materiales de rueda-raíl bajo diversas condiciones de dureza rueda/raíl y de fluencia. *Tribol Int.* 2020;143:106091.

<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.106091>

18. Zhang SY, Feng ZJ, Wang WJ, Zhao HY, Ding HH, Liu QY, entre otros. Efectos de las cargas normales variables sobre el comportamiento de fatiga de contacto por rodamiento del raíl bajo diversas frecuencias y creepages. *Llevar.* 2023;520-521:204670.

<https://doi.org/10.1016/j.wear.2023.204670>

19. Schotsman B, Huisman J, Santofimia MJ, Petrov RH, Sietsma J. Evolución de la microestructura y desarrollo de daños en los raíles de una línea ferroviaria de vía única tras el rectificado preventivo. *Llevar*. 2025;576-577:206101.

<https://doi.org/10.1016/j.wear.2025.206101>

20. Han ZY, Wang HH, Wang WJ, Zhang SY, Lin DM, Wang Y, entre otros. La correlación entre la microestructura deformada del material y la propagación por fatiga por contacto por rodamiento en el raíl U71Mn al emparejarse con la rueda CL60. *Tribol Int*. 2024;200:110069.

<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2024.110069>

21. Zhang X, Wu D, Xia Z, Zhang Y, Li Y, Wang J, et al. Características de la microestructura y mecanismos de formación de la capa de grabado blanco (WEL) y la capa de grabado marrón (BEL) en la canaleta de rodamientos de martensita. *Revista de Investigación y Tecnología de Materiales*. 2023;25:4876-87.

<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.06.217>

22. Al-Juboori A, Li H, Zhu H. Formación de capa de grabado blanco sobre raíles debido a acciones térmicas y mecánicas acopladas. *Llevar*. 2023;530-531:205063.

<https://doi.org/10.1016/j.wear.2023.205063>

23. Thiercelin L, Saint-Aimé L, Lebon F, Saulot A. Modelado termomecánico de las transformaciones tribológicas superficiales en la red ferroviaria (capa de grabado blanco). *Mecánica de los materiales*. 2020; 151 (octubre): 103636.

<https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2020.103636>

24. Pena LVW, Wang L, Mellor BG, Huang Y. Estructuras de grabado White en acero recocido 52100 que contienen acero procedente de pruebas de torsión a alta presión. *Tribol Int*. 2021;164:107187.

<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.107187>

25. Wan LB, Li SX, Lu SY, Su YS, Shu XD, Huang HB. Estudio de caso: Formación de capas de grabado blanco en una pista de rodamientos de elementos rodantes fallida. *Llevar*. 2018; 396-397 (julio 2017): 126-34.

<https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.07.014>

26. Li JG, Umemoto M, Todaka Y, Tsuchiya K. Una investigación microestructural de la superficie de un agujero perforado en aceros al carbono. *Acta Mater*. 2007; 55(4):1397-406.

<https://doi.org/10.1016/j.actamat.2006.09.043>

27. Hosseini SB, Beno T, Klement U, Kaminski J, Rytberg K. Temperaturas de corte durante torneado duro - Mediciones y efectos en la formación de capas blancas en AISI 52100. *J Mater Process Technol*. 2014; 214(6):1293-300.

<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.01.016>

28. Al-Juboori A, Zhu H, Li H, McLeod J, Pannila S, Barnes J. Investigación microestructural sobre una fractura de raíl asociada a defectos en sentadilla. *Eng Fail Anal*. 2023;151:107411.

<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107411>

29. Talebi N, Andersson B, Ekh M, Meyer KA. Influencia de una capa superficial altamente deformada en las predicciones de RCF para raíles en servicio. *Llevar*. 2025;578-579:206173.

<https://doi.org/10.1016/j.wear.2025.206173>

30. Liu J, Ou J, Li J, Yu Z, He C, Li P, et al. Mecanismo de inicio y propagación de grietas por fatiga similares a escamas de pez en un raíl templado con U75V. *Fallo de Eng Anal.* 2025;174:109468.
<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2025.109468>
31. Edjeou W, P.-O. L, Larsson R, A A. Efecto de la topografía superficial del carril en el desgaste y fatiga. *Llevar.* 2025;206218.
<https://doi.org/10.1016/j.wear.2025.206218>
32. Kanematsu Y, Uehigashi N, Matsui M, Noguchi S. Influencia de una capa descarbonizada en la formación de microgrietas en raíles ferroviarios: Investigación in situ y estudio de doble disco. *Llevar.* 2022;504-505:204427.
<https://doi.org/10.1016/j.wear.2022.204427>
33. Tosangthum N, Krataitong R, Wila P, Koiprasert H, Buncham K, Kansuwan P, et al. El comportamiento de desgaste en seco por rodamiento y deslizamiento de la rueda ER9 y el raíl R260 se acoplan bajo condiciones de funcionamiento diferentes. *Llevar.* 2023;518-519:204636.
<https://doi.org/10.1016/j.wear.2023.204636>
34. Carroll RI, Beynon JH. Fatiga por contacto por rodamiento de la capa de grabado blanco: Parte 1. Morfología de la grieta. *Llevar.* 2007; 262(9-10):1253-66.
<https://doi.org/10.1016/j.wear.2007.01.003>
35. Grassie SL. Sendillas y defectos tipo sentadilla en los rieles: el entendimiento hasta la fecha. *Proc Inst Mech Eng F J Rail Rapid Transit.* 2012; 226(3):235-42.
<https://doi.org/10.1177/0954409711422189>
36. Österle W, Rooch H, Pyzalla A, Wang L. Investigación de capas de grabado blanco sobre raíles mediante microscopía óptica, microscopía electrónica, difracción de rayos X y rayos X sincrotonizados. *Ciencia e Ingeniería de Materiales A.* 2001; 303(1-2):150-7.
[https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(00\)01842-6](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(00)01842-6)
37. Lojkowski W, Djahanbakhsh M, Bürkle G, Gierlotka S, Zielinski W, Fecht HJ. Formación de nanoestructuras en la superficie de las vías del tren. *Ciencia e Ingeniería de Materiales A.* 2001;
[https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(00\)01947-X](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(00)01947-X)
38. Zhang HW, Ohsaki S, Mitao S, Ohnuma M, Hono K. Investigación microestructural de capa de grabado blanco sobre raíl de acero perlita. *Ciencia e Ingeniería de Materiales: A.* 2006; 421(1):191-9.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.01.033>
39. Wu J, Petrov RH, Naeimi M, Li Z, Dollevoet R, Sietsma J. Simulación de laboratorio de la formación de martensita de capa de grabado blanco en acero ferroviario. *Fatiga Int J.* 2016;91:11-20.
<https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2016.05.016>
40. Takahashi J, Kawakami K, Ueda M. Análisis por tomografía atómica de la capa blanca de grabado en la superficie de una vía férrea. *Acta Mater.* 2010; 58(10):3602-12.
<https://doi.org/10.1016/j.actamat.2010.02.030>
41. Masoumi M, Lima NB De, Tressia G, Sinatora A, Goldenstein H. Evolución de la microestructura y orientación cristalográfica por debajo de la capa blanca superficial de un riel perlítico usado. *Revista de Investigación y Tecnología de Materiales.* 2019; 8(6):6275-88.

<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.10.021>

42. Newcomb SB, Stobbs WM. Un estudio de microscopía electrónica de transmisión de la capa de grabado blanco en una cabeza de raíl. *Ciencia e Ingeniería de Materiales*. 1984; 66(2):195-204.

[https://doi.org/10.1016/0025-5416\(84\)90180-0](https://doi.org/10.1016/0025-5416(84)90180-0)

43. Baumann G, Fecht HJ, Cinturón de Ley S. Formación de capas de grabado blanco sobre las orugas de los raíles. *Llevar*. 1996; 191(1-2):133-40.

[https://doi.org/10.1016/0043-1648\(95\)06733-7](https://doi.org/10.1016/0043-1648(95)06733-7)

44. Jaramillo J, Sánchez JC, Suárez-Bustamante FA, Vargas D, Vargas G, Toro A, et al. Implementación de la técnica de ruido magnético de Barkhausen para la caracterización microestructural del acero de los raíles. *J Evaluación de NoDestrucción*. 2025; 44(2):42.

<https://doi.org/10.1007/s10921-025-01184-y>

45. Li S, Wu J, Petrov RH, Li Z, Dollevoet R, Sietsma J. "Capa de grabado marrón": ¿Una posible nueva visión sobre el inicio de la grieta de la fatiga por contacto por rodamiento en aceros de raíl? *Eng Fail Anal*. 2016;66:8-18.

<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2016.03.019>

46. Wang L. Microestructura y estado residual de tensiones en la zona de contacto de raíles y ruedas. 2002.

47. Steenbergen M, Dollevoet R. Sobre el mecanismo de formación de cuclillas en los raíles del tren - Parte I: Originación. *Fatiga Int J*. 2013;47:361-72.

<https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2012.04.023>

48. Thiercelin L, Cazottes S, Saulot A, Lebon F, Mercier F, Le Bourlot C, et al. Desarrollo de pruebas de cizalladura controladas por temperatura para reproducir la formación de capas de grabado blanco en acero perlítico para raíles. *Materiales*. 1 de octubre de 2022; 15(19).

<https://doi.org/10.3390/ma15196590>

49. Liu JP, Huang H, Liu A, Ma SN, Ren Y, Ding HH, et al. Mecanismo de formación de capas de grabado blanco en aceros perlíticos bajo abrasión continua. *Llevar*. 1 de julio de 2025;572-573.

<https://doi.org/10.1016/j.wear.2025.206050>

50. Zhou Y, Peng JF, Luo ZP, Cao BB, Jin XS, Zhu MH. Evolución de fase y microestructura en la capa de grabado blanco de un acero perlítico durante la fricción entre rodamiento y deslizamiento. *Llevar*. 2016;362-363:8-17.

<https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.05.007>

51. Kumar A, Agarwal G, Petrov R, Goto S, Sietsma J, Herbig M. Evolución microestructural de capas de grabado blanco y marrón en aceros perlíticos para raíles. *Acta Mater*. 2019;171:48-64.

<https://doi.org/10.1016/j.actamat.2019.04.012>

52. Baumann G, Zhong Y, Fecht HJ. Comparación entre la formación de nanofases durante el desgaste superficial inducido por fricción y la pérdida mecánica de un acero perlítico. *Materiales nanoestructurados*. 1996; 7(1):237-44.

[https://doi.org/10.1016/0965-9773\(96\)00305-4](https://doi.org/10.1016/0965-9773(96)00305-4)

53. Schotsman B, Huisman J, Santofimia MJ, Petrov RH, Sietsma J. Evolución de la microestructura y desarrollo de daños en los raíles de una línea ferroviaria de vía única tras rectificado preventivo.

Llevar. 15 de agosto de 2025; 576-577.

<https://doi.org/10.1016/j.wear.2025.206101>

54. Russo M, Saulot A, Sauvage X, Véron M, Rauch E, Thiercelin L, et al. Investigaciones microestructurales multiescala de capas de grabado blanco y marrón que inician la formación de squat en aceros perláticos. Mater Charact. 1 de noviembre de 2025; 229.

<https://doi.org/10.1016/j.matchar.2025.115477>

55. Hieu Nguyen B, Al-Juboori A, Zhu H, Zhu Q, Li H, Tieu K. Mecanismo de formación y evolución de capas de grabado blanco en diferentes pendientes ferroviarias. Fatiga Int J. 1 de octubre de 2022.

<https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.107100>

56. Al-Juboori A, Li H, Zhu H. Formación de capa de grabado blanco sobre raíles debido a acciones térmicas y mecánicas acopladas. Llevar. 2023 oct 15;530-531.

<https://doi.org/10.1016/j.wear.2023.205063>