



Dyna

ISSN: 0012-7353

dyna@unalmed.edu.co

Universidad Nacional de Colombia

Colombia

Valencia Giraldo, Asdrúbal; Rendón Martínez, José Luis
El problema del desgaste ondulatorio en las vías férreas: la metalurgia de un caso real
Dyna, vol. 71, núm. 144, noviembre, 2004, pp. 29-38
Universidad Nacional de Colombia
Medellín, Colombia

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49614404>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal

Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

EL PROBLEMA DEL DESGASTE ONDULATORIO EN LAS VÍAS FÉRREAS: LA METALURGIA DE UN CASO REAL

ASDRÚBAL VALENCIA GIRALDO

Ingeniería de Materiales, Universidad de Antioquia, avalen@udea.edu.co

JOSÉ LUIS RENDÓN MARTÍNEZ

Incomat Ltda., Incomat@epm.netco

Recibido 10 de Septiembre de 2004, aceptado 27 de Septiembre de 2004, versión final 10 de Octubre de 2004

RESUMEN: El desgaste ondulatorio en las vías férreas es un problema detectado y estudiado desde hace más de cien años; sin embargo, los trabajos realizados, algunos de gran magnitud, han considerado básicamente los aspectos dinámicos que generan el fenómeno y tan sólo en los últimos decenios se ha hecho énfasis en los aspectos metalúrgicos, y se ha reconocido el alto grado de responsabilidad que cabe al material de los rieles y a su capacidad de responder a los esfuerzos que soporta. Generalmente, el fenómeno se presenta meses o años después de que el sistema empieza a operar; sin embargo, en el caso que nos ocupa el desgaste ondulatorio de los rieles se manifestó a escasos 15 días de iniciar su funcionamiento. Lo prematuro del problema, inquietó a todos los interesados y se propuso un estudio global del fenómeno, principalmente de las causas de su temprana formación, sin abandonar las posibles medidas de tipo preventivo y correctivo y su posterior evaluación. En este contexto, se realizó el estudio del problema desde el punto de vista del riel; se realizó un concienzudo análisis del metal y las características del fenómeno, como resultado se postuló una hipótesis sobre el mecanismo de daño y se logró la apropiación de una información adicional de utilidad para los encargados e interesados en la vía permanente. Además, se propuso una solución mediante el aumento general de la dureza del riel con tratamiento térmico, cuyas bondades se demostraron a escala del laboratorio.

PALABRAS CLAVE: desgaste, desgaste ondulatorio, riel, acero, metalografía, dureza, endurecimiento in situ.

ABSTRACT: Railways undulatory wear is a problem detected and studied since 100 years back; however, most of the works, some of them quite extensive, have mainly considered the dynamic aspects and only a few during the last decades have emphasized the metallurgical features, and it has been recognized that the rail material is highly responsible for the problem. In general, this phenomenon appears several months or years after the system operations start; however, in this case, undulatory wear was apparent after only 15 days of operation; this early appearance called the attention of all people involved in this transportation system. For that reason a general study was started, looking for preventive measures. It was in this context that this study of the rail material was carried out; metal was thoroughly analyzed, undulatory wear was measured, and, as result, a hypothesis for the damage mechanism was postulated so an additional information was at hand for the responsible of the system. Also a solution, by means of in situ hardening, was proposed, this technique was proved at laboratory scale.

KEY WORDS: undulatory wear, rail, steel, metallography, hardness, in situ hardening

1. INTRODUCCIÓN

El desgaste ondulatorio (DO) es un desgaste diferencial en la cabeza de los rieles, con características ondulatorias y longitudes de onda relativamente constantes⁽¹⁾. El fenómeno se identifica visualmente por la existencia de zonas brillantes, picos, y zonas oscuras, valles,⁽²⁾ debidas a diferentes tipos o tasas de desgaste

⁷⁾. Estas ondulaciones producen un gran aumento en las vibraciones de todo el sistema y muchos problemas, tanto en la vía como en el material rodante; además incrementan la contaminación sonora hasta en cinco veces.

Desde 1895 existen estudios sobre el DO, principalmente en sus aspectos dinámicos, y

algunos sobre el mecanismo de daño del material y sobre las prevenciones o correcciones.

El fenómeno se clasifica por la longitud de onda⁽⁸⁾; para este caso son importantes los de onda muy corta (de 30 a 60 mm) y corta (de 60 a 250 mm). El primero de éstos se caracteriza por unos picos brillantes, de longitud aproximadamente constante y unos valles opacos; se presenta en vías largas y con velocidades superiores a 100 km/h. El pico es una zona de mayor dureza (hasta 1000 HV), en algunos casos con una fase blanca, posiblemente martensita; esta fase se observa a todo lo largo del riel, antes de manifestarse el DO, y es removida posteriormente en los valles⁽⁹⁾.

El DO corto son depresiones más o menos pronunciadas en la superficie de rodamiento, sin diferencia aparente entre picos y valles brillantes. Ocurre en vías de tráfico urbano y se inicia de manera preferencial en el riel inferior de curvas con radio menor a 600 m. Al igual que en el desgaste muy corto, se ha observado la fase blanca en los picos y no en los valles⁽¹⁰⁾.

Repitamos que este trabajo se centra en el material, sin olvidar las particularidades dinámicas que propician las condiciones periódicas sobre la estructura. En opinión de los autores, el DO puede explicarse, en gran parte, a partir de lo que ocurre en el metal, y una vez detallado el mecanismo se facilitan las soluciones, evaluando las diferentes etapas del proceso de formación.

Los aspectos fundamentales del problema estudiado son los siguientes: el fenómeno se evidenció a los 15 días de iniciado el funcionamiento, hecho bastante prematuro de acuerdo con todos los antecedentes.

Los primeros síntomas se presentaron en los hilos inferiores de las curvas con radio menor a 450 m; la longitud de onda más frecuente fue entre 80 y 130 mm, con valores bastante dispersos; no se encontró relación entre el radio de la curva y la longitud de onda, ni aún

en casos particulares como el de curvas circulares y de transición. El riel es denominado UIC 54, carril en acero no tratado o naturalmente duro, el cual se entregó como material de resistencia al desgaste calidad A y mínima resistencia a la tracción de 880 MPa.

De acuerdo con la resistencia a la tracción, la dureza del material debe ser superior a 266 HBN⁽¹¹⁾; aún cuando no se especifica la dureza mínima y la norma ASTM A1 señala que debe acordarse entre el comprador y el fabricante, sí establece que para pesos entre 42.2 y 56.6 kg/m, la dureza mínima es 248 HBN y para superiores a 57 kg/m de 285 HBN.⁽¹²⁾

La composición química del material se ajusta a la especificación RENFE y a la norma ASTM A1, que se presentan en la tabla I. Es importante mencionar que los contenidos de fósforo, azufre, cobre, aluminio, cinc e hidrógeno y el proceso de fabricación, solidificación, tamaño del tocho de laminación, número de pasadas, condiciones de enfriamiento y de enderezado de los rieles, determinan, en gran medida, la calidad metalúrgica⁽¹³⁻¹⁸⁾; el acero en cuestión, dado su contenido de manganeso y de carbono, solidifica en una composición muy propensa a los rechupes interdendríticos, sinónimo de microporosidades y defectos no detectables con los ensayos ultrasónicos, pero que influyen sobre el comportamiento mecánico de la pieza.

2. EVALUACIONES REALIZADAS

Lo prematuro del fenómeno fue señal de posibles deficiencias en las propiedades del acero, por ello se midió dureza en el material original y en la vía, mediante un diseño estadístico que ofreció un 95 % de confiabilidad y un 5 % de error. En una sección retirada de la vía, con evidencias claras de DO, se caracterizaron las zonas de pico y valle, su dureza, su macro y microestructura y la incidencia de las zonas afectadas por corrosión sobre la creación de diferencias en el material.

Tabla 1. Especificación para la composición química del material de los rieles.

<i>ELEMENTO (%) – ESPECIFICACIÓN</i>	<i>RENFE 03.360.101</i>	<i>ASTM A1</i>
CARBONO (C)	0.60 - 0.80	0.67 - 0.80
MANGANESO (Mn)	0.80 - 1.30	0.70 - 1.00
FÓSFORO (P), MÁXIMO	0.05	0.035
SILICIO (Si)	0.10 - 0.50	0.10 - 0.50
AZUFRE (S), MÁXIMO	0.05	0.04

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Dureza del Material Original y el Instalado en la Vía

Se hizo un diseño estadístico que consideró la longitud de los tramos rectos y la de las curvas con radios mayores y menores a 450 metros; se determinó el número de muestras en cada uno de los estratos para tener un 95 % de confiabilidad y un error máximo del 5 % y se seleccionaron los puntos exactos de manera aleatoria. La dureza del material original fue de 253 HBN; en las rectas se encontró una dureza de 267 HBN y en las curvas con radio mayor y menor de 450 metros 299 HBN y 288 HBN respectivamente.

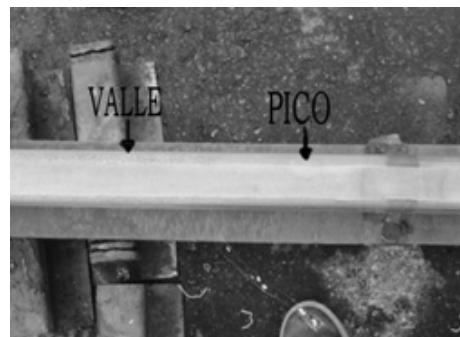
Los resultados mostraron que no existe una relación estrecha entre el radio de la curva y el endurecimiento del material, lo que, en alguna medida, resta responsabilidad a los aspectos dinámicos de la operación y refuerza la idea de que el riel, y su capacidad de respuesta a los esfuerzos, puede ser la variable de mayor incidencia en el problema.

Se retiró un tramo de riel de la vía con evidencia de DO y se hicieron medidas de dureza. El valor promedio en las zonas de valle fue de 305 HBN, en los picos de 315 HBN y una diferencia máxima entre un pico y un valle contiguos de 17 HBN. La longitud de onda promedio fue de 67 mm. Los valores de dureza junto con la inspección visual, fueron los criterios fundamentales para la selección de las probetas para los demás análisis.

Macroataque de las Zonas de Pico y de Valle

Se macroatacó y observó el tramo retirado. En la figura 1 se presenta el registro fotográfico. Se cortaron los cupones, se macroatacó la cabeza y se hizo el análisis longitudinal del material en los picos y los valles. En la figura 2 se pueden observar, en la zona de un pico, microgrietas transversales que se inician en las picaduras de corrosión, y en la zona de valle se evidencia un alto flujo plástico del material sin la formación de tales microgrietas.

Con base en lo anterior se puede afirmar que este DO se caracteriza por un pronunciado flujo plástico en los valles (fig. 3), debido a los esfuerzos de contacto, y corrugación por fatiga en las zonas de menor área de contacto rueda riel (fig. 2), lo cual crea los picos ⁽¹⁹⁾. La corrosión tiene marcada influencia en la creación de microgrietas, debido a: a) la presencia de óxidos que impiden el flujo plástico (aplastamiento y quebradura de herrumbre) e inhiben la adherencia de las superficies lo que origina el esfuerzo cortante y b) el picado ancla el desplazamiento del metal, endureciéndolo localmente y favoreciendo su creación ⁽²⁰⁻²³⁾.



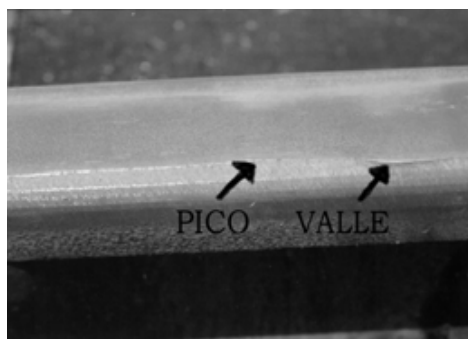


Figura 1. Vista general de las zonas de pico y valle en el riel retirado de la vía

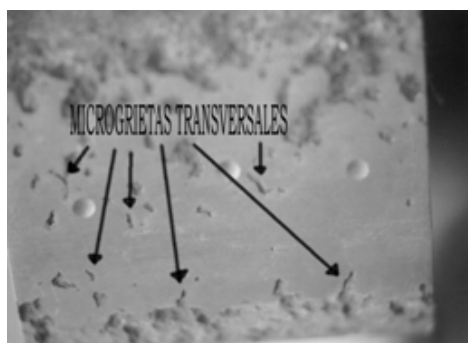
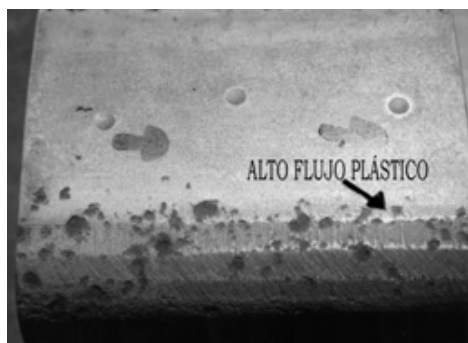


Figura 2. Zona de pico con microgrietas que se inician en los puntos de corrosión por picado.

El macroataque de la sección transversal, figura 3, confirma la existencia de flujo plástico en las zonas de valle, fenómeno que no se presentó en las zonas de los picos.

Estudio Metalográfico

La metalografía del riel original y de las zonas de pico y de valle puso en evidencia una gran cantidad de imperfecciones de un tamaño

considerable, microporosidades y posiblemente rechupes interdendríticos. En la figura 4 se presenta la imagen del material antes del ataque con Nital 2 y en la tabla II la cuantificación de estas imperfecciones.

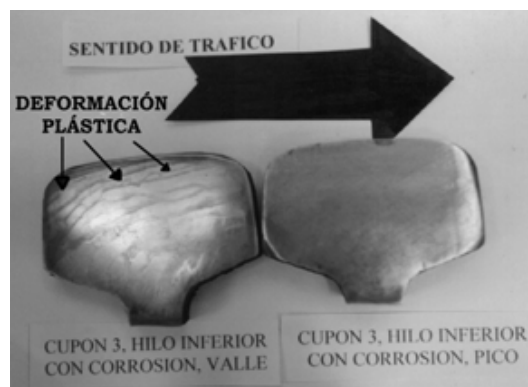


Figura 3. Macroestructura típica de la sección transversal del riel en zonas de pico y valle

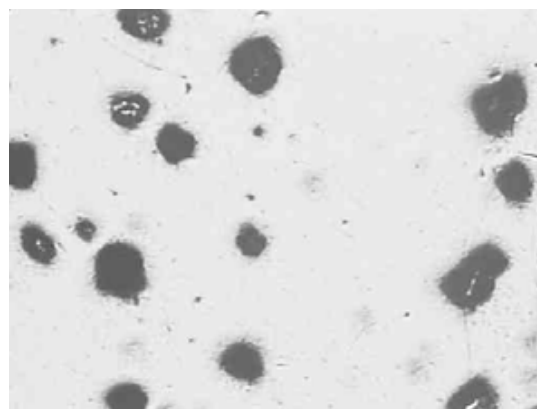


Figura 4. Fotomicrografía de las imperfecciones en el material del riel. 400 X

Tabla 2. Cuantificación de las imperfecciones en el material de los rieles con analizador de imágenes

PARÁMETROS DE IMPERFECCIONES	PROMEDIO
% ÁREA, MÁXIMA	14.55
% ÁREA, PROMEDIO	6.10
% ÁREA MÍNIMA	1.73
ÁREA PROMEDIO (μm^2)	26.19
ÁREA MÁXIMA (μm^2)	377.06

La microestructura típica es la presentada en la figura 5, caracterizada por un límite de grano de ferrita bastante ancho y diferentes tipos de perlitas, gruesa y grosera, sin orden en sus láminas y con gran espaciado interlaminar. El tipo de perlita y su espaciado interlaminar están directamente relacionados con la calidad metalúrgica de la aleación, su resistencia y su dureza (y por tanto su resistencia a la fatiga por contacto)⁽²⁴⁾.

En la figura 6 se presenta la microestructura de las zonas de pico y de valle. En los primeros hay pérdida de los límites de grano, los que permanecen, en alguna medida, en los valles. La pérdida de los límites de grano (ferrita) en la zona de picos, se debe a un escurrimiento del metal hacia las imperfecciones, que tiende a llenarlas, lo que genera flujo plástico localizado y apelmazamiento del material removido en el proceso, como se puede observar en la secuencia de la figura 7, donde se ve la fluencia y la llegada del material removido a la imperfección.

Es generalizada la mencionada relación entre el flujo plástico, el daño causado por éste y la creación de condiciones diferenciales en el metal, con algún grado de responsabilidad en el DO⁽²⁵⁻³²⁾. Trabajos actuales en esta área y en general en el desgaste de metales, señalan, desde algún grado de responsabilidad hasta una relación absoluta en el daño del metal y un

flujo plástico localizado, a las inclusiones y microimperfecciones que éste contenga^(33,34,35,36). En este estudio se determinó la clara relación entre las imperfecciones, llámese poros, inclusiones o espacios dejados por éstas, con el flujo plástico localizado.

Hipótesis del Mecanismo de Daño

Con base en los resultados, se postula la hipótesis del mecanismo de daño, que se divide en tres etapas. En todos los casos se considera la acción de esfuerzos tangenciales en la superficie del riel, producto de la existencia de esfuerzos laterales para guiar los coches y de fenómenos de deslizamiento de la rueda en acción conjunta con la anterior.

La primera etapa se inicia con el material original, con diferentes resistencias a los esfuerzos, función directa de su composición química y su calidad metalúrgica. Los esfuerzos periódicos de tracción y tangenciales actúan indiscriminadamente sobre toda la longitud del riel, ejerciendo esfuerzos laterales en todos los puntos. Es importante considerar la probabilidad de que un punto determinado reciba esfuerzos de tracción o tangenciales, por lo tanto, estadísticamente, en esta etapa todos los puntos reciben todas las clases de esfuerzos.

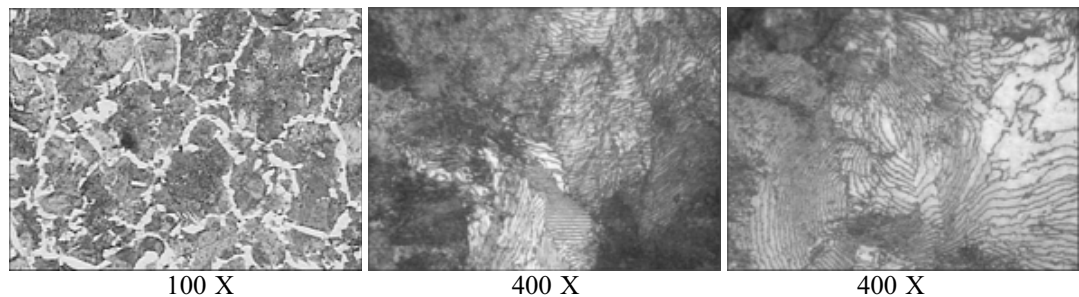
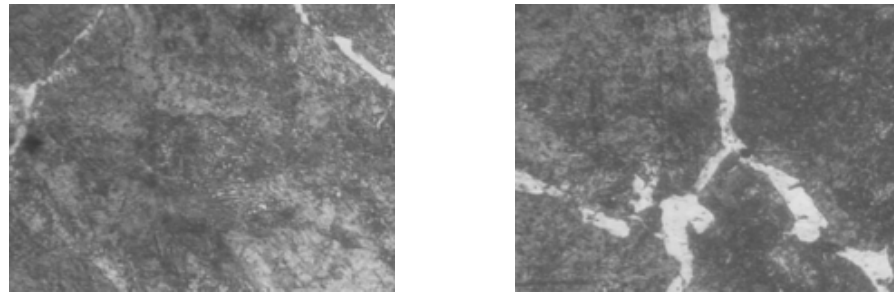
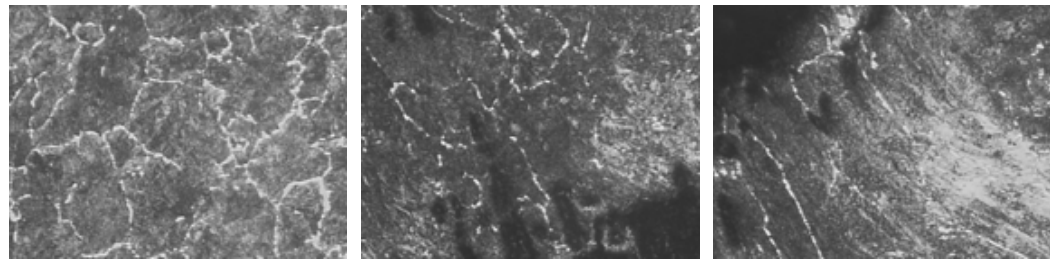


Figura 5. Microestructura típica del material del los rieles



Zona de Pico

Zona de Valle

Figura 6. Microestructura de las zonas de pico y valle. 400 X

Material Inalterado

Pérdida de Límites de
GranoFlujo Total del Material
Hacia la Imperfección**Figura 7.** Diferentes grados de deterioro. Material que fluye hacia los poros o espacios vacíos, siempre en el sentido del tráfico (400 X)

De acuerdo con la magnitud de los esfuerzos tangenciales y la capacidad de respuesta del material se presentará flujo plástico en toda la superficie, acá se manifestó con el mismo ángulo de orientación de los granos en picos y valles y se ha reconocido como un importante mecanismo de desgaste en los rieles^(37, 38). Las inclusiones e imperfecciones que generan flujo plástico localizado y la incidencia de los esfuerzos tangenciales en sitios preferenciales dan lugar a la segunda etapa, crean zonas con mayor flujo plástico, mayor grado de deformación y mayor área transversal de la superficie⁽³⁹⁻⁴²⁾.

Con estas condiciones del material, los esfuerzos tangenciales (deslizamientos) tienen, en las zonas anchas, un área suficientemente grande para generar esfuerzos de contacto, denominada en tribología como el área de equilibrio⁽⁴³⁾. Estas áreas imprimen al sistema la energía suficiente para generar apoyo en estos puntos y desplazamientos laterales entre ellos, con la frecuencia implícita de las condiciones dinámicas. Estas condiciones de

apoyo y fuerzas de tracción en unas zonas y esfuerzos tangenciales y deslizamiento en otras, generan mayor endurecimiento y menor flujo plástico en las primeras y alta tasa de desgaste y continuación de la deformación plástica en las segundas⁽⁴⁴⁻⁴⁷⁾.

En estas condiciones se inicia la tercera etapa, que es básicamente la intensificación de los fenómenos que se presentan en cada zona. En los picos, por ser zonas duras y sometidas a esfuerzos normales, se da un mayor endurecimiento, una permanencia de la microestructura característica y un comportamiento elástico del metal, con formación de grietas típicas de altos esfuerzos de contacto y deformaciones plásticas⁽⁴⁸⁻⁵¹⁾; en los valles, sometidos a esfuerzos laterales, favorecidos por un bajo contacto producto del efecto rampa del pico inmediatamente anterior y por las condiciones dinámicas que entraron en resonancia con la topografía del riel, no se da endurecimiento del metal y se incrementa la tasa de desgaste; mayores fuerzas tangenciales y mayores deslizamientos llevan a mayores tasas de desgaste y por otro lado, la

disminución en el área de contacto disminuye el desgaste que son las condiciones encontradas para valles y picos respectivamente.

Solución Mediante Endurecimiento por Tratamiento Térmico

Aceptada la responsabilidad de la baja capacidad del material para resistir las cargas de operación, se consideró el endurecimiento de los rieles como una medida preventiva pues se lograba una disminución en la tasa general de desgaste del material como ayuda a evitar el DO, pues se sabe del efecto nocivo del flujo plástico del material, hecho que se inhibiría en buena parte con un riel más duro. Adicionalmente, tener una dureza homogénea garantiza que el flujo no va estar localizado en puntos preferenciales, que es el aspecto nucleador del DO. Con el endurecimiento se logra una microestructura más resistente y homogénea, límites de grano definidos y perlitas con un menor espaciamiento interlaminar, que ofrecen una mejor resistencia al desgaste general y evitan el DO.

La propuesta consistía en el endurecimiento del material in situ, procedimiento más económico que la compra e instalación de rieles nuevos. Esto permite evaluaciones periódicas para certificar su efectividad frente a los problemas que se atacan, sin incurrir en una alta inversión con la incertidumbre que tiene esta medida correctiva. Como es un tratamiento localizado, pues se hace énfasis en la cabeza, los costos son menores que para un tratamiento de toda la masa del elemento.

El proceso logra una transformación microestructural a perlita fina, con un tamaño de grano y una separación entre láminas que

dan mayor dureza y una mejor respuesta al desgaste general y al DO. La perlita y la ferrita son las fases del material, o sea que con el proceso no se tendrán fases diferentes, sólo se logrará una microestructura con mejor capacidad de respuesta a los esfuerzos mecánicos. El volumen general no se verá afectado sustancialmente.

Endurecer a valores entre 30 y 36 Rockwell C, necesita un enfriamiento lento, lo que determinó el diseño del sistema de calentamiento. Esto limita la velocidad general del proceso pero garantiza una transformación metalúrgica que no atenta contra el material. Inicialmente se trabajó en un cupón de 50 cm. y se determinaron las variables básicas del proceso, la temperatura máxima, el tiempo de permanencia, la velocidad de calentamiento y la velocidad de enfriamiento. Así, se cuantificó la velocidad general del proceso y se fabricó el sistema para el tratamiento térmico; el calentamiento se realizó con gas y el enfriamiento con aire forzado, con unas condiciones de flujo estrictamente controladas en los dos casos. Por razones de espacio no se darán acá más detalles, baste con comparar las distribuciones de dureza mostradas en las figuras 8 y 9, para comprender los beneficios del tratamiento térmico in situ.

Como se evidencia en las figuras, el producto terminado representa ventajas notables frente al elemento original. Es muy importante obtener una mayor dureza en el material e igualmente la homogeneidad en esta variable.

Un parámetro de suma importancia para el desempeño de los rieles son las tensiones internas, variable que se cuantificó en secciones antes y después del endurecimiento con la medida de la dureza en la sección transversal del riel y sobre las líneas expuestas en la figura 10; los resultados son presentados en la tabla III.

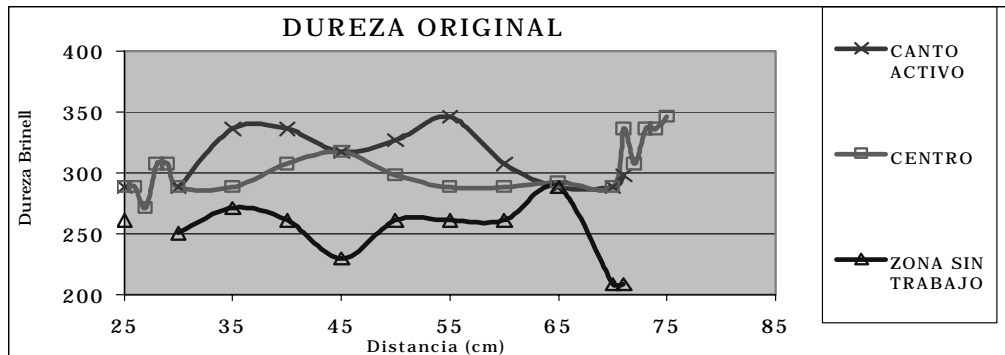


Figura 8. Dureza del riel antes del tratamiento térmico

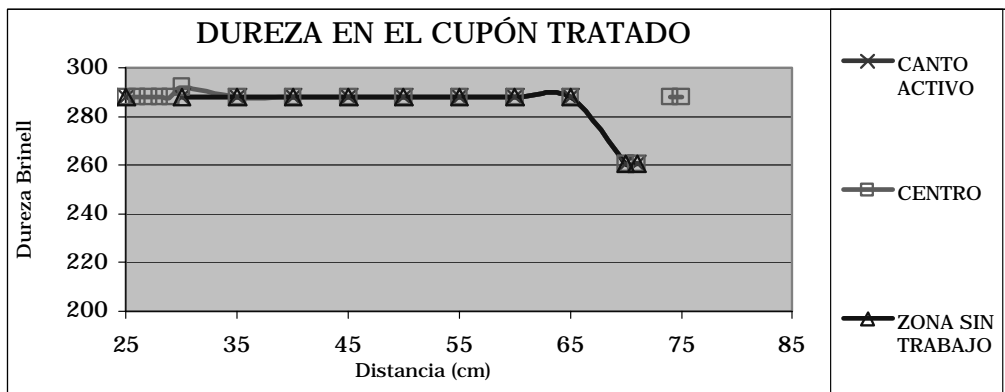


Figura 9. Dureza del riel con tratamiento térmico

Tabla 3. Valores de r^2 de las líneas de tendencia de los valores de dureza del riel original y del riel endurecido

LÍNEA	R ² Lineal				
	A	B	C	D	E
SECCIÓN ORIGINAL	0.4050	0.2413	0.6476	0.5026	
SECCIÓN ENDURECIDA	0.7152	0.9498	0.8565	0.8943	0.5507

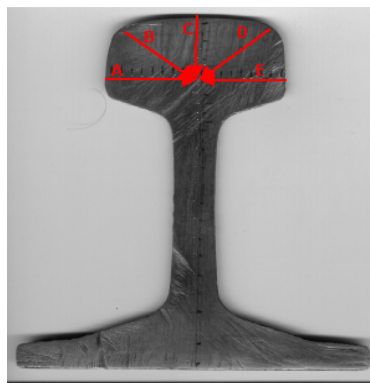


Figura 10. Líneas de medida de dureza de las secciones de riel.

Como se evidencia en la tabla, los esfuerzos internos en el riel original son de una mayor magnitud que los del riel endurecido; los valores obtenidos están dentro de los parámetros de aceptación estipulados para la operación de los elementos.

4. CONCLUSIONES

- El estudio metalúrgico del DO evaluado, señaló la baja calidad del material como el principal responsable de su aparición prematura.
- Con base en las evaluaciones realizadas se postuló una hipótesis del mecanismo

de formación de los picos y valles y del desgaste ondulatorio en general.

- De acuerdo con esta hipótesis, mejorar la resistencia del material con el endurecimiento apropiado, optimizar su microestructura sin generar altas tensiones residuales internas, es la medida correctiva con la mejor relación costo – beneficio.
- Se alcanzó un gran desarrollo tecnológico con el endurecimiento de riel in situ, con unos resultados finales en el material que se ajustan a las exigencias metalúrgicas y mecánicas estipuladas sobre el tema.

5. REFERENCIAS

1. Carneiro Machado, Pedro A., Uma contribuicao ao estudo do desgaste ondulatorio de trilhos, Sao Paulo, Departamento de Desenvolvimento Tecnológico p. 104, 1990.
2. Carneiro Machado, Pedro A., Ibidem.
3. Clayton, CLAYTON, P., Tribological aspects of wheel - rail contact: a review of recent experimental research, Wear, Vol. 191,p. 170 – 183, 1996.
4. Muster, Hans et. al., Rail rolling contact fatigue: the performance of naturally hard and head - hardened rails in track., Wear., Vol. 191 (1996), p. 54 – 64.
5. Grassie, Stuart L., Short wavelength rail corrugation: field trials and measuring technology., Wear., Vol. 191 (1996), p. 149 – 160.
6. Kalousek, J. et. al, Tribological interrelationship of seasonal fluctuations of freight car wheel wear, contact fatigue shelling and composition brakeshoe consumption., Wear., Vol. 191,1996, p. 210 – 218.
7. Peng Y. y Kalousek, J. Keeping heavy-haul track corrugation- free, Railway Gazette International, Ago. 1989, p. 545-547.
8. Carneiro Machado, Pedro A., Op. Cit.
9. Carneiro Machado, Pedro A., Idem.
10. Carneiro Machado, Pedro A., Idem.
11. Valencia, Asdrúbal, Tecnología del tratamiento térmico de los materiales., Medellín, Editorial Universidad de Antioquia, 1992, p. 17.
12. Standard specification for carbon, steel tee rails / ASTM Book of standards, 1992. __ p. 1- 6.
13. Comentarios técnicos en la fabricación de rieles de acuerdo con el más avanzado nivel tecnológico ferroviario, Voest - Alpine Schienen., Germany. Voest - Alpine Schienen, 31 p.
14. Ibidem
15. Valencia, Asdrúbal, Ibidem.
16. Especificación técnica para el suministro de carril en acero no tratado / RENFE 03.360.101, 12 p.
17. Especificación técnica para el suministro de carril en acero no tratado / RENFE 03.360.101, 12 p.
18. RMS-1 grinding train reduces rail replacement burden., Railway Gazette International, Jul. – 1984, 534 – 535.
19. Sarkar A., D., Desgaste de metales, México, Limusa, 1990., 229 p.
20. Kalousek, J. et. al, Ibidem.
21. Sarkar A., D., Ibidem.
22. Wang, Y. et. al., Role of nonmetallic inclusions in fatigue, pitting, and corrosion fatigue., Corrosion Science. Vol. 52, no. 2, feb. – 1996, p. 92 – 103.
23. Wang Y. et al, Ibidem.
24. Muster, Hans et. al., Op. Cit.– 64.
25. Clayton, P., Op. Cit.
26. Muster, Hans et. al., Op. Cit.– 64.
27. Grassie, Stuart L., Op. Cit.
28. Kalousek, J. et. al, Op. Cit.
29. Peng Y. y Kalousek, J., Op. Cit.
30. RMS-1 grinding train reduces rail replacement burden., Railway Gazette International, Jul. – 1984, 534 – 535.
31. Sarkar A., D., Op. Cit.
32. Aknin P. et. al, Contribution of railway dynamics modes to the understanding of the metallurgical

- behaviour of the rail tread, *Wear*, Vol. 191, 1996), p. 126-132.
33. Clayton, P., Op. Cit.
 34. Muster, Hans et. al., Op. Cit.
 35. Wang Y. et al, Op. Cit.
 36. Beynon, J. H. et. al., Rolling contact fatigue of three pearlitic rail steels, *Wear*, Vol. 192, 1996, p. 94 – 111.
 37. Clayton, P., Op. Cit.
 38. Grassie, Stuart L., Op. Cit.
 39. Clayton, P., Op. Cit.
 40. Kalousek, J. et. al, Op. Cit.
 41. Peng Y. y Kalousek, J., Op. Cit.
 42. Beynon, J. H. et. al., Op. Cit.
 43. Sarkar A., D., Op. Cit.
 44. Grassie, Stuart L., Op. Cit.
 45. Beynon, J. H. et. al., Op. Cit.
 46. Clayton, P., Op. Cit.
 47. Grassie, Stuart L., Op. Cit.
 48. Clayton, P., Op. Cit.
 49. Kalousek, J. et. al, Op. Cit.
 50. Peng Y. y Kalousek, J., Op. Cit.
 51. Beynon, J. H. et. al., Op. Cit.